

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою
«Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та
електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Теорія автоматичного керування: Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Б. І. Приймак. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 84 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 3 від 28.11.2019 р.) за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 4 від 25.11.2019 р.)

Електронне мережне навчальне видання

ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладач: *Приймак Богдан Іванович*, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний редактор *Толочко О. І.*, док. техн. наук, проф.

Рецензент *Гайденко Ю. А.*, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри електромеханіки факультету електроенерготехніки та автоматики КПІ ім. Ігоря Сікорського

Подано лабораторний практикум до дисципліни "Теорія автоматичного керування". Лабораторний практикум включає методичні вказівки до виконання чотирьох лабораторних робіт, що охоплюють основні розділи теорії лінійних безперервних систем автоматичного керування (САК). Сюди відносяться часові та частотні характеристики типових ланок, точність САК в ustalених процесах за типових зовнішніх дій, стійкість та якість систем керування, синтез коригувальних пристроїв САК.

Лабораторний практикум призначений для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Лабораторна робота №1 Дослідження часових та частотних характеристик типових ланок систем автоматичного керування	5
2 Лабораторна робота №2 Дослідження усталених режимів роботи систем автоматичного регулювання	28
3 Лабораторна робота №3 Дослідження стійкості та якості лінійних систем автоматичного керування	52
4 Лабораторна робота №4 Синтез послідовних коригувальних пристроїв лінійних систем автоматичного керування	62
Список рекомендованої літератури	80
Додаток А Порядок побудови асимптотичних ЛАХ	81
Додаток Б Заходи з техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт	84

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Теорія автоматичного керування» належить до базових дисциплін у професійній підготовці бакалаврів за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність». Вона надає необхідні знання для оволодіння дисциплінами «Нелінійні та дискретні системи автоматичного керування», «Керування електроприводами», «Основи мехатроніки» для 1-го (бакалаврського) рівня, а також «Системи оптимального та інтелектуального керування» і «Робастне керування» для 2-го (магістерського) рівня.

Метою дисципліни є підготовка студентів у сфері проектування, дослідження, налагодження та експлуатації сучасних автоматичних систем керування електромеханічними об'єктами. Результатом вивчення дисципліни є набуття студентами ґрунтовних знань і умінь щодо аналізу, синтезу і дослідження електромеханічних систем автоматичного керування.

Лабораторний практикум містить методичні вказівки до виконання чотирьох лабораторних робіт, тематика яких охоплює основні розділи кредитного модулю «Теорія автоматичного керування-1». Завданням лабораторних робіт є закріплення знань методів аналізу та синтезу лінійних систем автоматичного керування, набуття навичок дослідження їх статички та динаміки, опрацювання та узагальнення отриманих результатів.

У методичних вказівках до кожної лабораторної роботи подані основні теоретичні відомості, необхідні для підготовки, виконання та наступного захисту звіту з виконаної роботи. Крім цього, методичні вказівки містять програму роботи, вказівки для її виконання, опис лабораторної установки, зміст звіту з лабораторної роботи та контрольні запитання для підготовки до захисту звіту.

Для поглибленого вивчення матеріалу, що стосується теми досліджень, необхідно звернутися до рекомендованої літератури. Студенти повинні самостійно готуватися до лабораторної роботи, використовуючи конспект лекцій, методичні вказівки та рекомендовану літературу.

Заключний етап лабораторної роботи – оформлення звіту. Звіт подається на аркушах паперу формату А4. Необхідний зміст звіту подано в описі кожної лабораторної роботи. Звіт з виконаної роботи подається керівнику лабораторних занять і захищається студентами.

1 Лабораторна робота №1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСОВИХ ТА ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВИХ ЛАНОК СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета роботи: закріплення теоретичних знань щодо математичного опису в часовій та частотній областях типових ланок систем автоматичного керування (САК), набуття практичних навичок з експериментального визначення перехідних та частотних характеристик динамічних об'єктів, і отримання їх передатних функцій.

Тривалість лабораторної роботи – 4 год.

Тривалість самостійної роботи – 4 год.

1.1 Короткі теоретичні відомості

1.1.1 Часові та частотні характеристики ланок

Для оцінювання динамічних властивостей системи та її окремих ланок прийнято досліджувати їх реакцію на типові входні дії, які найповніше відображають особливості реальних зовнішніх дій. Такий підхід, по-перше, дозволяє порівнювати окремі ланки між собою з точки зору їх динамічних властивостей. По-друге, маючи реакцію ланки чи системи на типові дії, можна робити висновки, як вона буде реагувати на інші зміни зовнішніх дій.

Основними динамічними характеристиками ланок (систем) є:

- часова характеристика $y(t)$, коли $u(t)$ – довільна функція часу, де u – входна дія, а y – вихідна величина ланки;
- перехідна функція або характеристика (*step response*) $y(t) = h(t)$, що є реакцією ланки на одиничний стрибок входної дії $u(t) = 1(t)$;
- вагова функція або характеристика (*impulse response*) $y(t) = w(t)$, що є реакцією ланки на одиничний імпульс входної дії $u(t) = \delta(t)$.

За визначенням одиничний імпульс, який також називають δ -функцією Дірака, є похідною від одиничного стрибка

$$\delta(t) = [1(t)]'.$$

Тому, відповідно, вагова характеристика буде похідною від перехідної характеристики

$$w(t) = [h(t)]'.$$

Якщо вхідна дія є неединичною східчастою функцією $u(t) = k \cdot 1(t)$, $k = \text{const}$ то вихідна величина буде дорівнювати $y(t) = k \cdot h(t)$.

Частотні характеристики описують усталені вимушені коливання на виході ланки, які викликані гармонічним сигналом на вході. Якщо на вхід лінійної ланки поданий гармонічний сигнал $u = u_{\max} \sin \omega t$, то по закінченні перехідного процесу на виході ланки будуть існувати гармонічні коливання з тією же частотою, що і вхідні коливання, але в загальному випадку з іншими амплітудою та фазою: $y = y_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$.

При постійній амплітуді вхідних коливань амплітуда і фаза усталених коливань на виході ланки залежать від частоти вхідних коливань. Якщо збільшувати від нуля частоту коливань і визначати усталені значення амплітуди і фази вихідних коливань для різних частот, можна одержати залежність від частоти відношення амплітуд $A = y_{\max} / u_{\max}$ і зсуву фази φ вихідних і вхідних усталених коливань. Ці залежності називаються відповідно амплітудною частотною характеристикою (АЧХ) – $A(\omega)$ і фазовою частотною характеристикою (ФЧХ) – $\varphi(\omega)$.

Основною частотною характеристикою є амплітудно-фазова характеристика АФЧХ (АФХ). Її можна дістати двома способами: графоаналітичним і експериментальним.

Для побудови АФХ графоаналітичним методом у відповідній передатній функції $W(p)$ роблять підстановку $p = j\omega$, де $j = \sqrt{-1}$; ω – частота, що може змінюватись від 0 до ∞ або, в деяких випадках, від $-\infty$ до $+\infty$. На комплексній площині АФХ являтиме собою годограф вектора $W(j\omega)$, який в декартовій системі координат можна представити за допомогою дійсної $U(\omega)$ та уявної $V(\omega)$ компонент як

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega).$$

У полярній системі координат можна записати $W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$, де

$$A(\omega) = |W(j\omega)|; \quad \varphi(\omega) = \arg W(j\omega).$$

Якщо відомі вирази для дійсної та уявної частотних характеристик $U(\omega)$ та $V(\omega)$, то можна побудувати АЧХ та ФЧХ за формулами

$$A(\omega) = \sqrt{U(\omega)^2 + V(\omega)^2}, \quad \varphi(\omega) = \arctg[V(\omega)/U(\omega)].$$

Частотні характеристики САК можуть бути побудовані експериментально. Для цього необхідно подавати на вхід досліджуваної САК гармонічний сигнал з постійною амплітудою і різними частотами ω . Вихідний сигнал матиме вигляд гармонічних вимушених коливань, які відрізнятимуться від вхідного сигналу амплітудою і фазою. В результаті проведених дослідів для низки значень ω в інтервалі від 0 до ∞ ми зможемо побудувати:

- амплітудно-частотну характеристику $A(\omega)$;
- фазо-частотну характеристику $\varphi(\omega)$.

Часто також використовуються логарифмічні характеристики, які дозволяють істотно спростити аналіз та синтез складних САК. Ці характеристики будуються у вигляді двох графіків: асимптотичної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАХ) і логарифмічної [фазочастотної характеристики](#) (ЛФХ), які зазвичай розташовуються одна під одною.

Аналіз систем за допомогою ЛАХ та ЛФХ досить простий і зручний, тому знаходить широке застосування в різних галузях техніки, таких як [цифрова обробка сигналів](#), [електротехніка](#) та [теорія автоматичного керування](#).

При побудові логарифмічних характеристик по вертикальній осі відкладають логарифм відповідної величини в децибелах (дБ). Для знаходження відповідної величини в децибелах слід її десятковий логарифм помножити на 20. Отже ЛАХ буде визначатися за формулою

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) \text{ [дБ]}.$$

По горизонтальній осі частоти відкладають також у логарифмічному масштабі – в октавах або декадах (але записують часто значення самої частоти). Тому по горизонтальній осі масштаб буде нерівномірним. При цьому на початку координат можна розташувати значення $\lg \omega$ лише для $\omega > 0$, оскільки $\lg 0 = -\infty$.

Одна октава є величиною, що дорівнює різниці логарифмів деякої частоти ω і її подвоєного значення: $1 \text{ октава} = \lg 2\omega - \lg \omega = \lg 2 + \lg \omega - \lg \omega = \lg 2$. Одна декада відповідно дорівнює різниці логарифмів деякої частоти ω і її десятикратного значення: $1 \text{ декада} = \lg 10\omega - \lg \omega = 1$.

Із сказаного випливає, що інтервал, який дорівнює одній октаві або декаді, не залежить від абсолютних значень частоти ω . Правила побудови асимптотичних ЛАХ наведені у Додатку А.

Основні відомості про часові та частотні характеристики досліджуваних ланок подані нижче.

1.1.2 Характеристики об'єктів дослідження та їхні передатні функції

1 Аперіодична ланка 1-го порядку має передатну функцію:

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1}, \quad (1.1)$$

де K – коефіцієнт передачі ланки, T – стала часу ланки.

Перехідна характеристика ланки визначається виразом

$$h(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}}).$$

Вона представлена на рис.1.1,а. Якщо ця характеристика отримана експериментально, то за нею можна отримати сталу часу T і коефіцієнт передачі K , як показано на рис.1.1,а, та записати її передатну функцію (1.1).

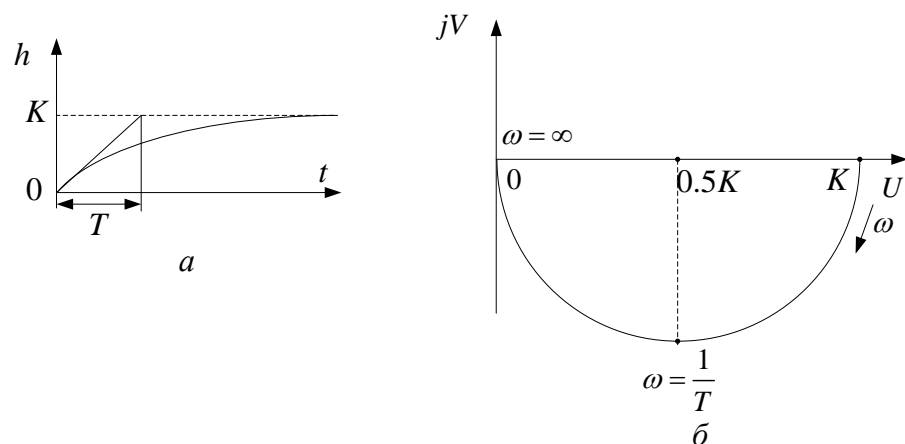


Рисунок 1.1 – Характеристики аперіодичної ланки 1-го порядку: а – часова; б – частотна

Вигляд АФХ аперіодичної ланки 1-го порядку наведений на рис.1.1,б. На рис. 1.2 зображено ЛАХ та ЛФХ аперіодичної ланки.

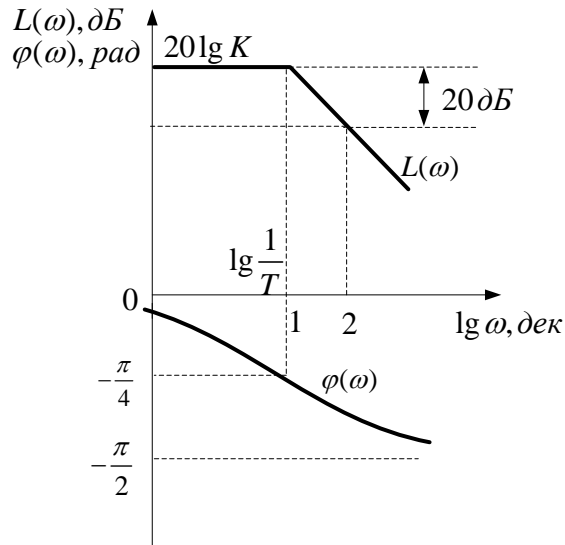


Рисунок 1.2 – ЛАХ та ЛФХ аперіодичної ланки 1-го порядку

2 Реальна диференціювальна ланка (реальний диференціатор) має передатну функцію:

$$W(p) = \frac{Kp}{Tp + 1}, \quad (1.2)$$

де T – стала часу ланки, K – коефіцієнт передачі. Перехідна характеристика ланки визначається виразом

$$h(t) = \frac{K}{T} e^{-\frac{t}{T}}.$$

Вона представлена на рис.1.3,а. Якщо ця характеристика отримана експериментально, то за її виглядом можна визначити сталу часу T , як показано на рис.1.3,а, та записати її передатну функцію (1.2).

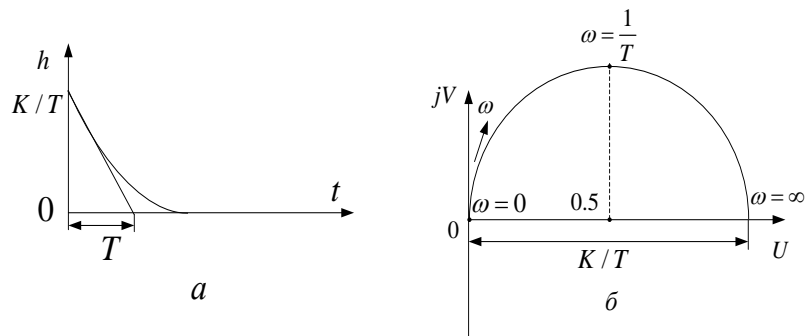


Рисунок 1.3 – Характеристики реального диференціатора: а – часова; б – частотна

Вигляд АФХ реальної диференціювальної ланки наведено на рис.1.3,б. На рис. 1.4 зображені ЛАХ та ЛФХ цієї ланки.

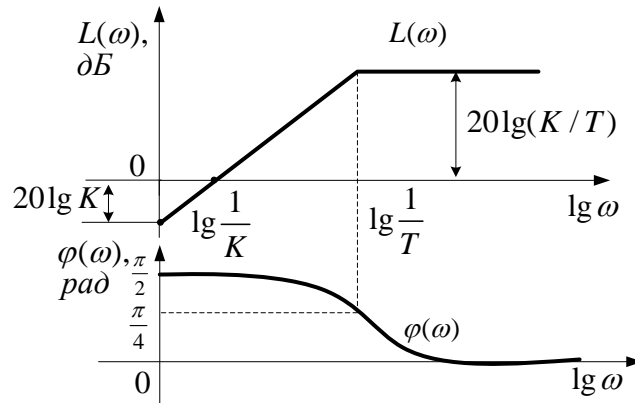


Рисунок 1.4 – Логарифмічні частотні характеристики реального диференціатора

3 Інтегро-диференціювальна ланка. Передатна функція ланки:

$$W(p) = K \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}. \quad (1.3)$$

де T_1, T_2 – сталі часу ланки. Перехідна характеристика ланки визначається як

$$h(t) = K \left[1 + (T_1/T_2 - 1) e^{-t/T_2} \right].$$

На рис. 1.5 наведені перехідні характеристики, а на рис. 1.6 – АФХ інтегро-диференціювальної ланки.

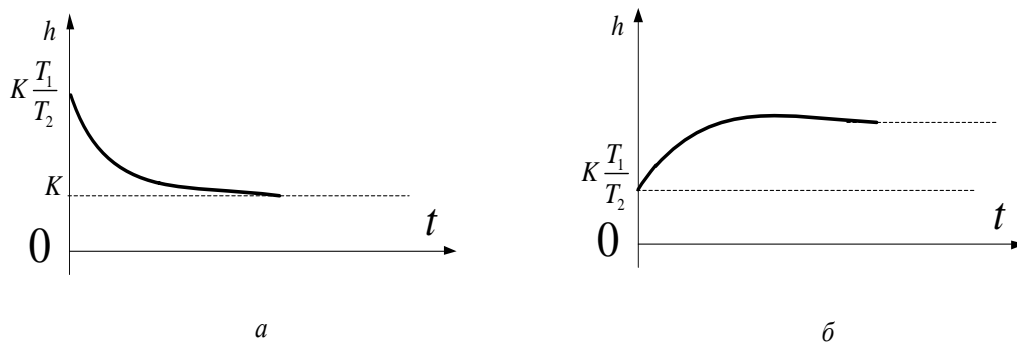


Рисунок 1.5 – Перехідні характеристики інтегро-диференціювальної ланки:

а – $T_1 > T_2$; б – $T_2 > T_1$

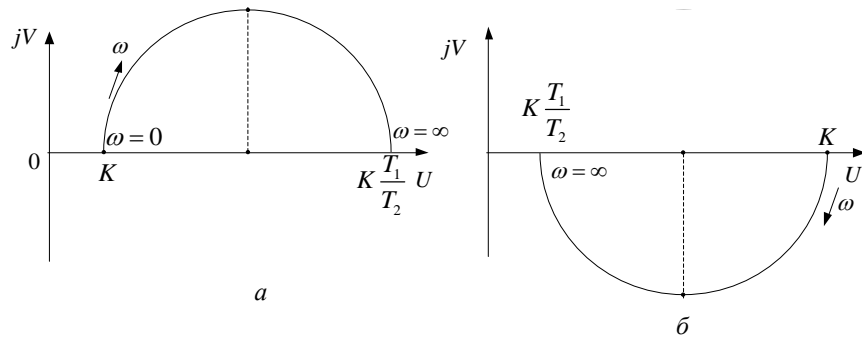


Рисунок 1.6 – АФХ інтегро-диференціовальної ланки: а – $T_1 > T_2$; б – $T_2 > T_1$

Графіки логарифмічної амплітудно і фазо-частотної характеристик наведено на рис. 1.7. Очевидно, що при $T_1 > T_2$ в середньочастотному діапазоні переважають диференціальні властивості ланки (нахил ЛАХ дорівнює $+20$ дБ/дек), а при $T_2 > T_1$ інтегровальні властивості (нахил ЛАХ дорівнює -20 дБ/дек).

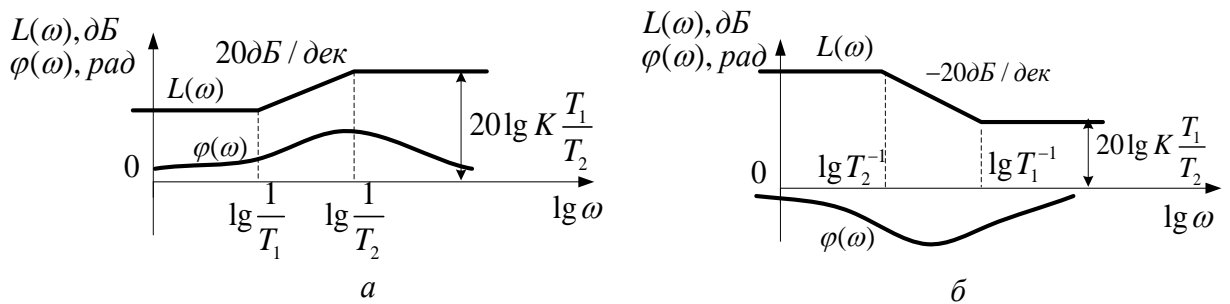


Рисунок 1.7 – ЛАХ та ЛФХ інтегро-диференціовальної ланки: а – $T_1 > T_2$; б – $T_2 > T_1$

4 Коливальна ланка. Ланки другого порядку мають передатну функцію:

$$W(p) = \frac{K}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (1.4)$$

де $T_1 = T$; $T_2 = 2\xi T$ – сталі часу, $\xi = \frac{T_2}{2T_1}$ – коефіцієнт затухання (демпфування). За-

лежно від коренів характеристичного рівняння ланки

$$T_1^2 p^2 + T_2 p + 1 = 0, \quad (1.5)$$

розрізняють коливальну ланку та аперіодичну ланку 2-го порядку. Коливальною ланка буде в разі наявності у рівнянні (1.5) комплексних коренів з від'ємною дійсною частиною, для чого необхідною умовою є $0 < \xi < 1$.

Перехідна характеристика ланки визначається виразом

$$h(t) = K \left[1 + (\beta T_1)^{-1} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \arctg \beta / \alpha) \right],$$

де $\alpha = \frac{T_2}{2T_1^2}$, $\beta = \frac{\sqrt{4T_1^2 - T_2^2}}{2T_1^2}$ – відповідно дійсна та уявна частини коренів $p_{1,2} = -\alpha \pm j\beta$ характеристичного рівняння (1.5).

За використання 2-го варіанту передатної функції в (1.4) перехідна характеристика ланки відповідатиме формулі

$$h(t) = K \left[1 + \left(\sqrt{1 - \xi^2} \right)^{-1} e^{-\xi \omega_0 t} \sin(\omega_k t + \varphi) \right],$$

де $\omega_0 = 1/T$ – резонансна частота ланки; $\omega_k = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ – власна частота коливань; $\tau = 2\pi / \omega_k$ – період коливань; $\varphi = \arctg(\sqrt{1 - \xi^2} / \xi)$ – фаза коливань $h(t)$. Параметри обох виразів перехідної характеристики пов'язані наступними співвідношеннями: $\beta = \omega_k$; $\alpha = \omega_k \xi / \sqrt{1 - \xi^2}$. Перехідна характеристика коливальної ланки наведена на рис. 1.8,а.

За експериментально отриманою перехідною характеристикою можна визначити параметри K, T_1, T_2 , а також T, ξ , тобто отримати обидва варіанти передатної функції ланки (1.4). При визначенні цих параметрів застосовують наступні співвідношення:

$$T_1^2 = \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2}; \quad T_2 = \frac{2\alpha}{\alpha^2 + \beta^2}; \quad T = T_1; \quad \xi = \frac{T_2}{2T_1}, \quad (1.6)$$

де $\alpha = -\frac{1}{\tau} 2,3 \lg \frac{A_2}{A_1}$, $\beta = \frac{2\pi}{\tau}$ – отримуються згідно з рис. 1.8,а.

Важливим показником коливальних перехідних процесів є перерегулювання – максимальне відхилення кривої перехідного процесу від нового усталеного значення в бік, протилежний від початкового значення. Воно визначається як

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h(\infty)}{h(\infty)} \times 100\%,$$

де $h_{\max}, h(\infty)$ – відповідно максимальне та усталене значення кривої.

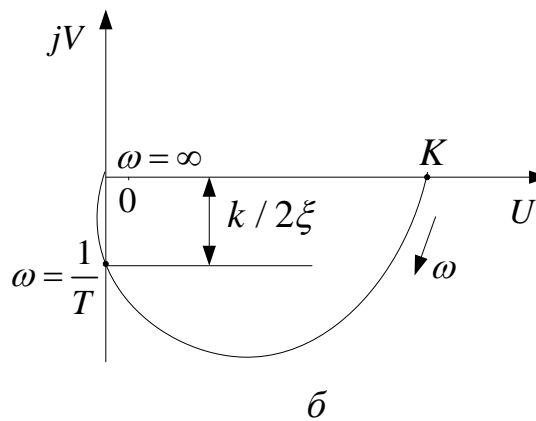
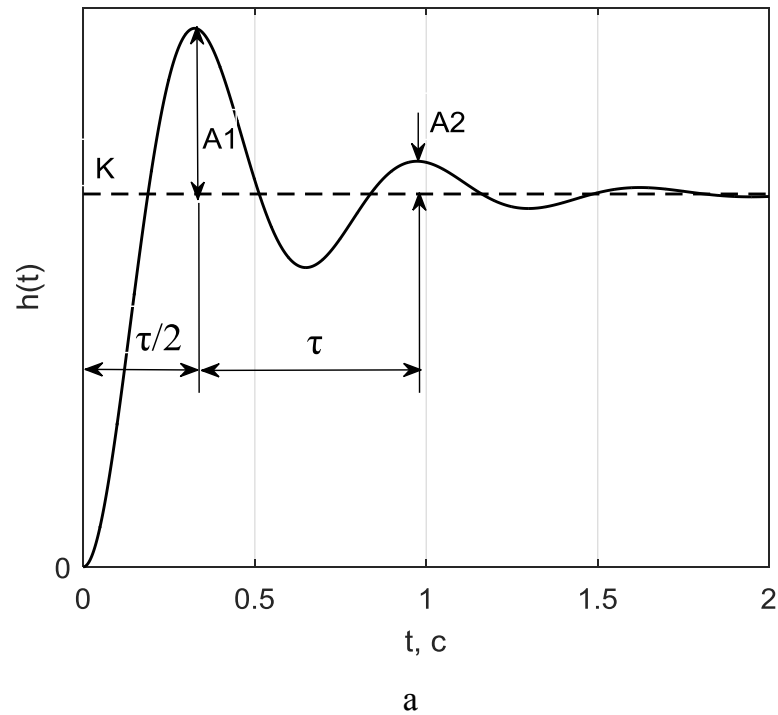


Рисунок 1.8 – Характеристики коливальної ланки: а – часова; б – частотна

Виконавши аналіз 2-го виразу для $h(t)$ можна отримати формули для аналітичного визначення перерегулювання та амплітуд коливань у вигляді

$$\sigma = e^{-(\xi/\sqrt{1-\xi^2})\pi} \times 100\%; \quad A_1 = Ke^{-(\xi/\sqrt{1-\xi^2})\pi}; \quad A_2 = Ke^{-(\xi/\sqrt{1-\xi^2})3\pi}.$$

Також можна отримати аналітичні вирази для часу наростання t_n та часу перехідного процесу (часу регулювання) t_p . Часом наростання називається час, за якого $h(t)$ вперше сягне рівня усталеного значення $h(\infty)$. Він обчислюється як

$$t_n = (\pi - \varphi) / \omega_k.$$

Часом регулювання називається час, коли $h(t)$ набуде значення $|h(t) - h(\infty)| \leq 0.05h(\infty)$. Цей час для коливальної ланки визначається як

$$t_n = 3/\xi\omega_k.$$

АФХ коливальної ланки наведена на рис.1.8,б. На рис. 1.9 зображені ЛАХ та ЛФХ коливальної ланки.

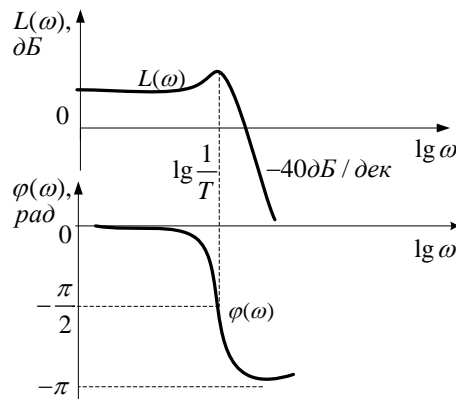


Рисунок 1.9 – Логарифмічні частотні характеристики коливальної ланки

5 *Аперіодична ланка 2-го порядку.* Ланка 2-го порядку з передатною функцією (1.4) буде аперіодичною за наявності у рівнянні (1.5) дійсних від'ємних коренів, для чого необхідною умовою є $\xi \geq 1$. Передатна функція аперіодичної ланки 2-го порядку може бути записана як

$$W(p) = \frac{K}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} = \frac{K}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}, \quad (1.7)$$

де сталі часу визначаються як $T_1 = T_3 T_4$; $T_2 = T_3 + T_4$;

$$T_{3,4} = \frac{T_2 \pm \sqrt{T_2^2 - 4T_1^2}}{2}; T_3 \geq T_4, \quad T_2 > 2T_1.$$

Перехідна характеристика аперіодичної ланки 2-го порядку визначається рівнянням

$$h(t) = K \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-t/T_3} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-t/T_4} \right).$$

Графік перехідної характеристика наведений на рис. 1.10.

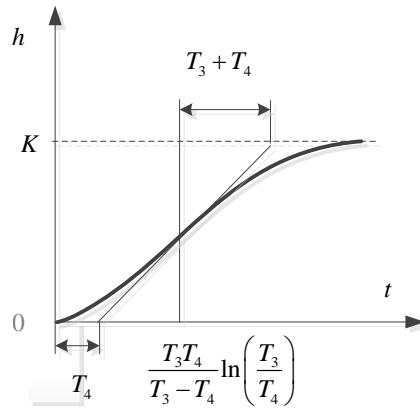


Рисунок 1.10 – Перехідна характеристика аперіодичної ланки 2-го порядку

ЛАХ та ЛФХ аперіодичної ланки 2-го порядку ($K = 1$) наведені на рис.1.11.

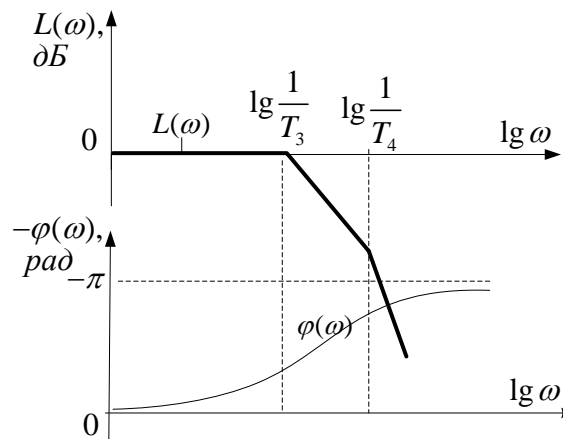


Рисунок 1.11 – ЛАХ та ЛФХ аперіодичної ланки 2-го порядку

Використовуючи експериментально отримані перехідну та (або) частотні характеристики можна визначити параметри K, T_3, T_4 , а за ними розрахувати T_1, T_2 , тобто отримати обидва варіанти передатної функції (1.7) аперіодичної ланки 2-го порядку. За перехідною характеристикою параметри K, T_3, T_4 визначаються згідно з рис. 1.10.

1.2 Опис лабораторної установки

1.2.1 Апаратна частина стенду

Функціональна схема лабораторної установки зображена на рис. 1.12. На функціональній схемі лабораторної установки (ЛУ) використані наступні позначення:

ПК – персональний комп'ютер; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ПН – підсилювач потужності; ОД – об'єкти дослідження; ФНЧ – фільтр низьких частот; БЖ – блок живлення; ДО – цифровий вихід; ШІМ – широтно-імпульсний модулятор; МП – масштабувальний перетворювач.

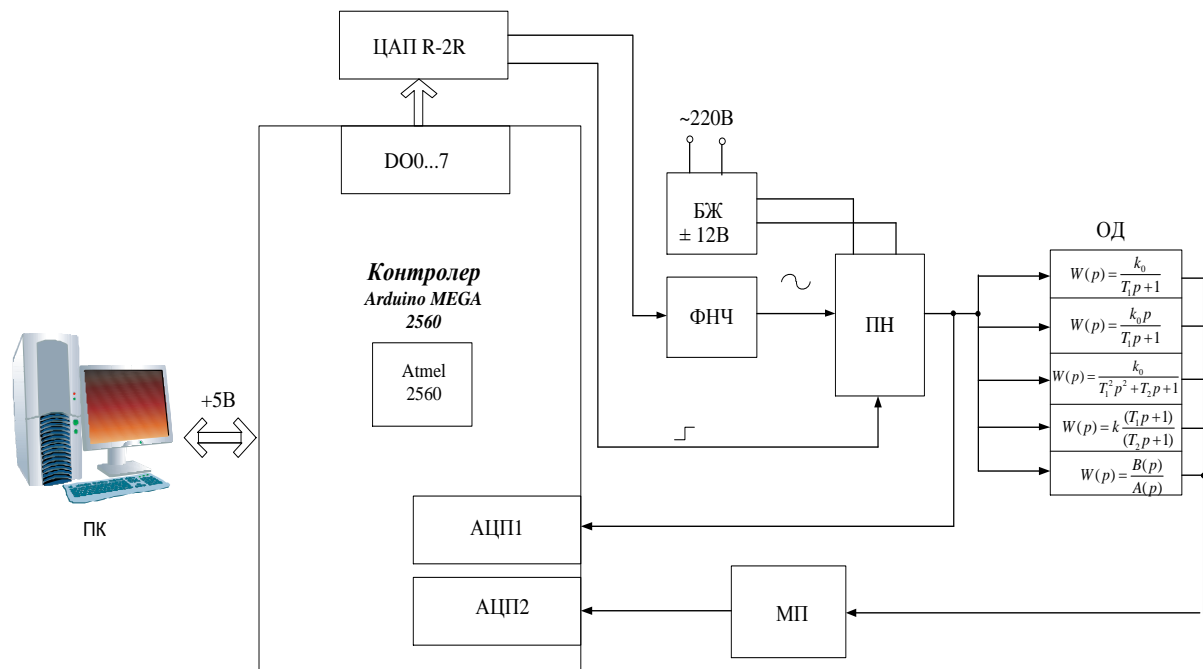


Рисунок 1.12 – Функціональна схема лабораторної установки

При побудові ЛУ бралися до уваги п'ять об'єктів дослідження (ОД), що відповідають типовим ланкам теорії автоматичного керування. Схеми їх реалізації, передатні функції та формули для розрахунку параметрів наведено нижче.

1) Аперіодична ланка 1-го порядку (ОД1). Схема ланки наведена на рис. 1.13.

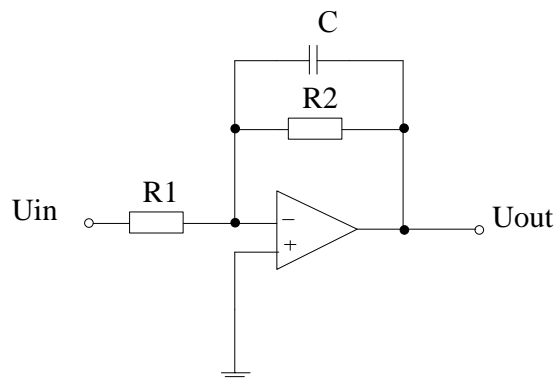


Рисунок 1.13 – Схема аперіодичної ланки 1-го порядку

Передатна функція ланки визначається як

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1}, \quad (1.8)$$

де $K = R_2/R_1$; $T = R_2C$; $R_1 = 15 \text{ кОм}$; $C = 1 \text{ мкФ}$.

2) Реальна диференціювальна ланка (ОД2). Схема реалізації зображена на рис. 1.14.

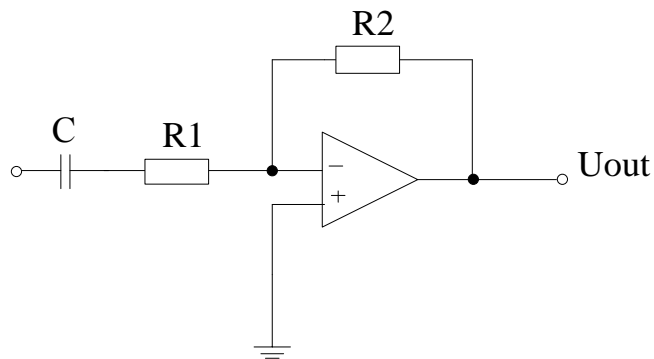


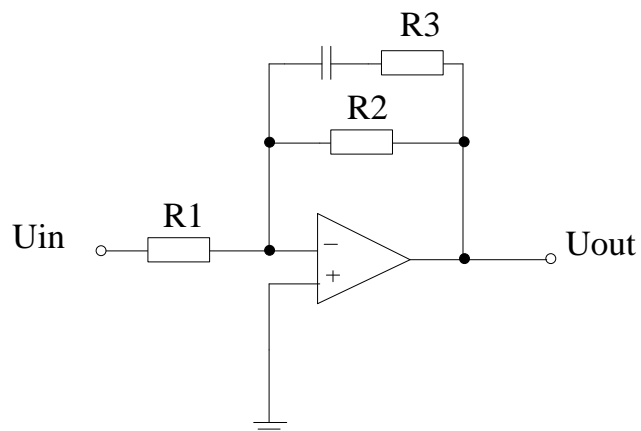
Рисунок 1.14 – Схема реальної диференціювальної ланки

Передатна функція ланки визначається як

$$W(p) = \frac{kTp}{Tp + 1}, \quad (1.9)$$

де $k = R_2/R_1$; $T = R_1C$; $R_2 = 5 \text{ кОм}$; $C = 1 \text{ мкФ}$.

3) Інтегро-диференціювальна ланка (ОД3). Схема ланки представлена на рис. 1.15.



1) Рисунок 1.15 – Схема інтегро-диференціювальної ланки

Передатна функція ланки визначається як

$$W(p) = \frac{K(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1}, \quad (1.10)$$

де $K = R_2/R_1$; $T_1 = R_3 C$; $T_2 = (R_2 + R_3)C$; $R_1 = 15 \text{ кОм}$; $R_3 = 5 \text{ кОм}$; $C = 1 \text{ мкФ}$.

4) *Аперіодична ланка 2-го порядку (ОД4)*. Для дослідження аперіодичної ланки 2-го порядку використовується фізичний об'єкт, яким є двигун постійного струму з незалежним збудженням (див. рис.1.16). Передатна функція двигуна

$$W(p) = \frac{u_{\text{тг}}}{u_{\text{я}}} = \frac{K}{T_{\text{я}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1}, \quad (T_{\text{м}} > 4T_{\text{я}}), \quad (1.11)$$

де $u_{\text{я}}$ – напруга якоря; $u_{\text{тг}}$ – напруга тахогенератора, що пропорційна швидкості обертання валу двигуна; $K = (C\Phi)^{-1} K_{\text{тг}}$; $C\Phi = 0.09 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$ – постійна величина; $K_{\text{тг}} = 0.012 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$ – коефіцієнт передачі тахогенератора; $T_{\text{я}}$ – стала часу якірного кола; $T_{\text{м}}$ – електромеханічна стала часу двигуна.

Стала часу якірного кола визначається як

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}, \quad (1.12)$$

де індуктивність та опір кола якоря з врахуванням дроселя дорівнюють $L_{\text{я}} = 0.3 \text{ Гн}$; $R_{\text{я}} = 12 \text{ Ом}$, а додатковий опір $R_{\text{д}}$ вибирається згідно з варіантом лабораторної роботи (див. п.1.3). Електромеханічна стала часу двигуна дорівнює

$$T_{\text{м}} = \frac{(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})J}{(C\Phi)^2}, \quad (1.13)$$

де $J = 8.1 \times 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – сумарний момент інерції двигуна.

Якщо отримано експериментальну перехідну характеристику двигуна, то за нею можна визначити параметри передатної функції (1.11) згідно з рис. 1.10. Порівнюючи (1.11) та (1.7), запишемо вирази для сталих часу

$$T_{3,4} = \left(T_{\text{м}} \pm \sqrt{T_{\text{м}}^2 - 4T_{\text{я}} T_{\text{м}}} \right) / 2. \quad (1.14)$$

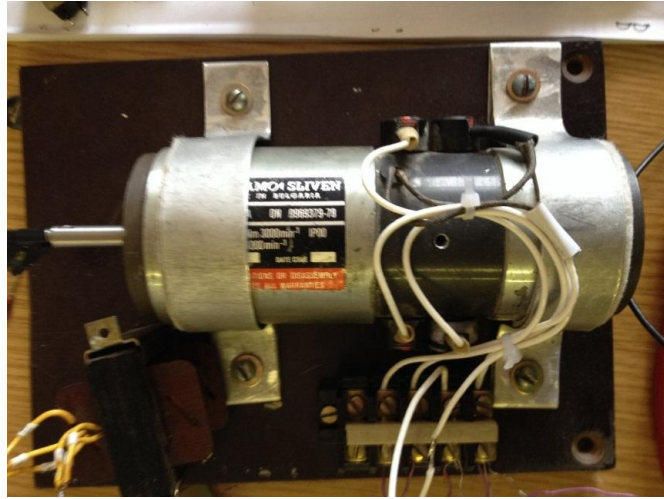


Рисунок 1.16 – Вигляд ОД4, що описується аперіодичною ланкою 2-го порядку

5) Коливальна ланка (ОД5). Схема реалізації представлена на рис. 1.17.

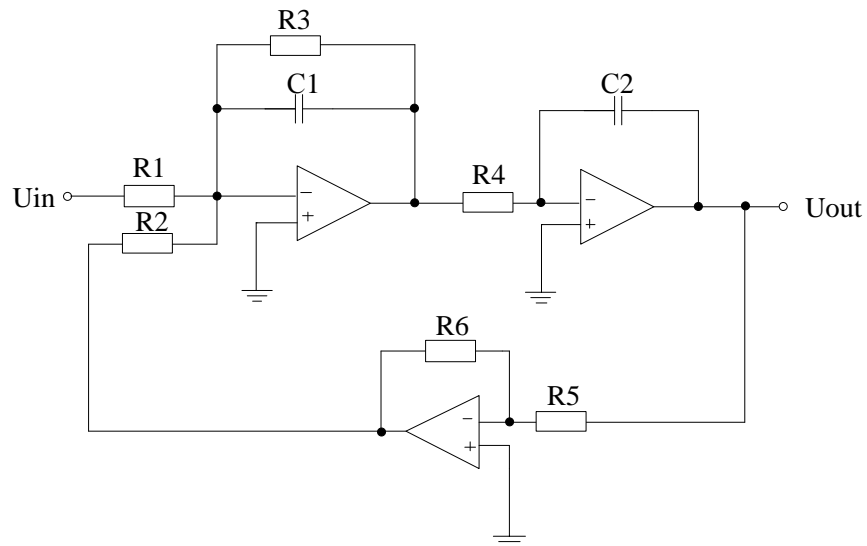


Рисунок 1.17 – Схема коливальної ланки

Передатна функція ланки визначається як

$$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (1.15)$$

$$\text{де } K = \frac{R_2 R_5}{R_1 R_6}; \quad T = \sqrt{\frac{R_2 R_4 R_5 C_1 C_2}{R_6}}; \quad \xi = \frac{1}{2R_3} \sqrt{\frac{R_3 R_4 R_5 C_1}{R_6 C_2}};$$

$$R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = R_6 = 10 \text{ кОм}; \quad C_1 = C_2 = 1 \text{ мкФ}.$$

Процедура зняття часової характеристики

1. Вибирається в програмі Arduino IDE стрибкоподібна вхідна дія і задається амплітуда та тривалість сигналу.
2. В середовищі Matlab отримуються сигнали з входу та виходу ОД.
3. Оцінюються результати на їх придатність. При потребі зменшується амплітуда вхідного сигналу (за наявності у вихідному сигналі ділянок з насиченням) та коригується його тривалість.
4. Зберігаються графіки сигналів з входу та виходу ОД на пристрої довготривалого зберігання інформації.

Процедура зняття частотної характеристики

1. Вибирається в програмі Arduino IDE гармонічна вхідна дія і задається її амплітуда та частота.
2. В середовищі Matlab отримуються сигнали з входу та виходу ОД.
3. Заміряються амплітуди вхідного і вихідного сигналів та заносяться у таблицю.
4. Заміряється зсув фаз $\varphi = \varphi_{\text{ex}} - \varphi_{\text{вих}}$ та заноситься у таблицю.
5. Задається наступне значення частоти вхідної дії, для неї виконуються пункти 2-4 і далі такі кроки повторюються до досягнення максимального значення частоти.
6. За отриманими у попередніх пунктах даними будуються логарифмічні амплітудна та фазова частотні характеристики об'єкта.

1.3 Програма роботи

1.3.1 Вивчити будову та принцип роботи ЛУ, підготувати її до роботи.

1.3.2 Отримати експериментально часові та частотні характеристики двох об'єктів, вказаних викладачем.

1.3.3 Параметри об'єктів взяти з таблиць (табл. 1.1 для ОД1 – ОД3, табл. 1.2 для ОД4 – ОД5) для вказаного викладачем варіанту.

1.3.4 За дослідними даними визначити експериментально параметри передавальних функцій ОД.

1.3.5 Розрахувати теоретичні передатні функції, часові та логарифмічні частотні характеристики ОД.

1.3.6 Порівняти експериментальні та теоретичні результати, зробити висновки та підготувати звіт.

Таблиця 1.1 – Параметри об'єктів дослідження ОД1 – ОД3

№ варіанту	Положення перемикача S1 (значення опору)		
	ОД1	ОД2	ОД3
1	1 ($R_2=5 \text{ кОм}$)	1 ($R_1=5 \text{ кОм}$)	1 ($R_2=5 \text{ кОм}$)
2	2 ($R_2=7.5 \text{ кОм}$)	2 ($R_1=7.5 \text{ кОм}$)	2 ($R_2=7.5 \text{ кОм}$)
3	3 ($R_2=15 \text{ кОм}$)	3 ($R_1=15 \text{ кОм}$)	3 ($R_2=15 \text{ кОм}$)
4	1 ($R_2=5 \text{ кОм}$)	2 ($R_1=7.5 \text{ кОм}$)	3 ($R_2=15 \text{ кОм}$)
5	2 ($R_2=7.5 \text{ кОм}$)	1 ($R_1=5 \text{ кОм}$)	3 ($R_2=15 \text{ кОм}$)
6	3 ($R_2=15 \text{ кОм}$)	3 ($R_1=15 \text{ кОм}$)	1 ($R_2=5 \text{ кОм}$)

Таблиця 1.2 – Параметри об'єктів дослідження ОД4 – ОД5

№ варіанту	Положення перемикача S2 (значення опору)	
	ОД4	ОД5
1	1 ($R_d=4.5 \text{ Ом}$)	1 ($R_3=10 \text{ кОм}$)
2	2 ($R_d=3.3 \text{ Ом}$)	2 ($R_3=15 \text{ кОм}$)
3	3 ($R_d=0 \text{ Ом}$)	3 ($R_3=20 \text{ кОм}$)
4	1 ($R_d=4.5 \text{ Ом}$)	2 ($R_3=15 \text{ кОм}$)
5	2 ($R_d=3.3 \text{ Ом}$)	3 ($R_3=20 \text{ кОм}$)
6	3 ($R_d=0 \text{ Ом}$)	1 ($R_3=10 \text{ кОм}$)

1.4 Методичні вказівки до виконання роботи

1.4.1 Отримання часових характеристик ланок

Для отримання експериментальної часової характеристики на ЛУ потрібно з'єднати провідниками клеми u_{in} та u_{out} з u_1 та u_2 досліджуваного об'єкту відповідно.

Далі слід виконати низку дій з програмною частиною ЛУ. Спочатку потрібно запустити програму Arduino IDE з робочою програмою та вибрати в панелі меню СЕРВИС – ПЛАТА – Arduino MEGA 2560. Також СЕРВИС – ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ПОРТ – COMn, де n – номер порту з яким працює контролер, як це показано на рис. 1.18.

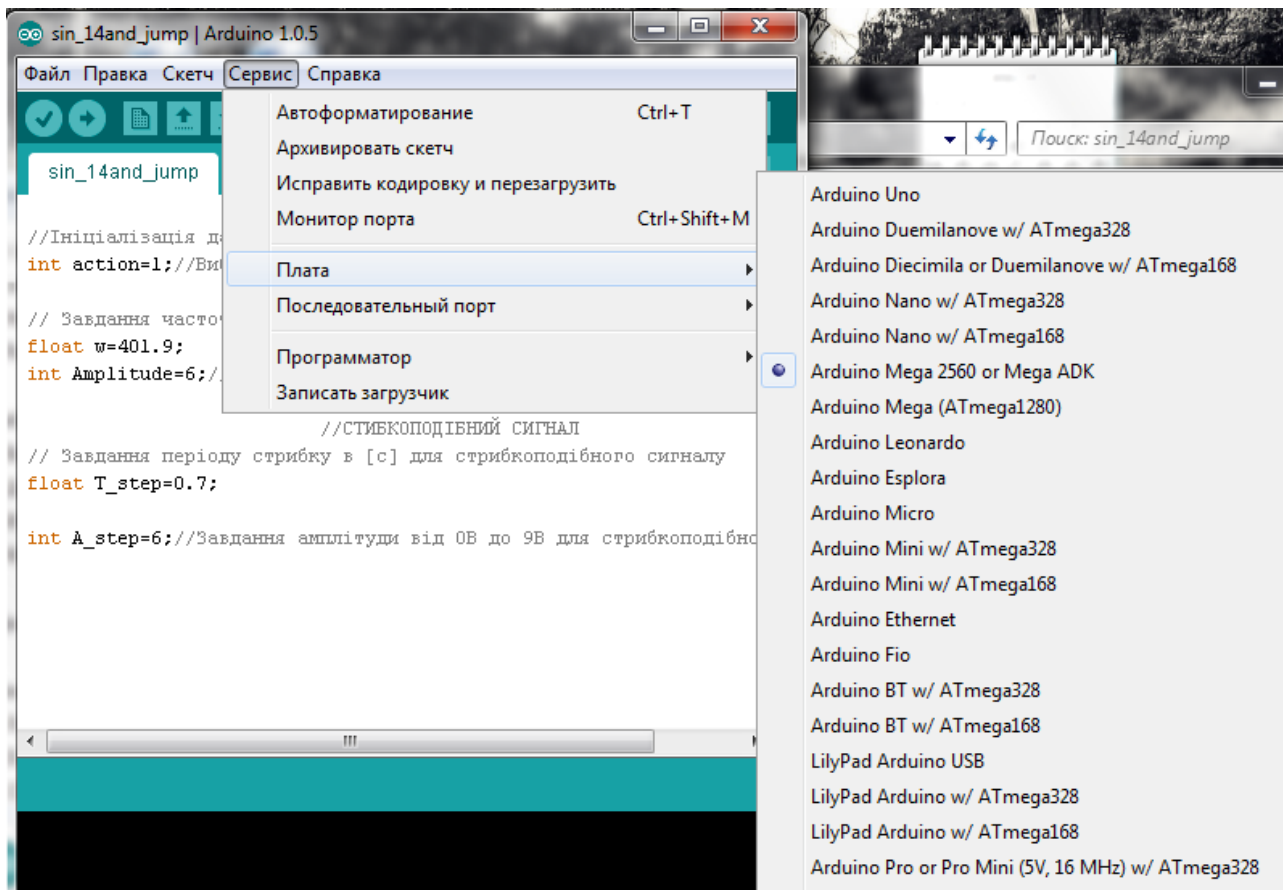




Рисунок 1.18 – Вікно програми Arduino IDE для першочергових налаштувань

- 1) Далі необхідно запустити програму Matlab (рис. 1.19), та відкрити відповідний файл програми роботи.
- 2) Після запуску обох програм, потрібно скористатися підказками в коді Arduino IDE у вигляді коментарів, та вибрати вхідну дію (**action=0 – синусоїдальний сигнал; action=1 – стрибкоподібний сигнал**. Тобто, для зняття часової характеристики потрібно вибрати **action = 1**. Також, можливо змінювати тривалість та амплітуду стрибкоподібного сигналу (**T_step=0.1...1; A_step=0...9 В**).
- 3) Потрібно в програмі Matlab задати значення **T_step=0.1...1**. Важливо, щоб задані значення в IDE відповідали заданим значенням в Matlab.

- 4) Після виконання всіх вимог, необхідно натиснути на , що призведе до компіляції та завантаження програми у контролер.
- 5) Далі треба перейти у вікно програми Matlab і натиснути на . На екрані з'являться графіки вхідного (синій колір) та вихідного (зелений колір) сигналів об'єкту дослідження.

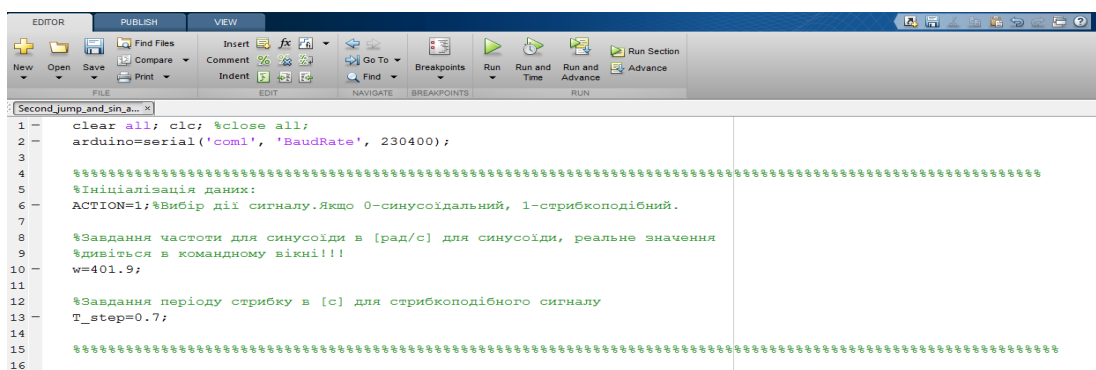


Рисунок 1.19 – Вікно програми Matlab

1.4.2 Отримання частотних характеристик ланок

Для отримання частотних характеристик ОД в програмі Arduino IDE треба вибрати тип вхідної дії: **action=0 – синусоїдальний сигнал**. Також задається частота та амплітуда синусоїдального сигналу (**w=6.28...628 рад/с; Amplitude=0...10 В**). Дослідні дані заносяться в табл. 1.3, де подано рекомендовані значення частоти.


Таблиця 1.3 – Дослідні дані для побудови частотних характеристик


$\omega, \text{с}^{-1}$	6.28	12.56	25.12	50.24	100.4	200.9	401.9	502.4	628
A1, В									
A2, В									
$\phi, \text{рад}$									

Значення амплітуди вхідного сигналу бажано задавати на рівні $6 \div 8$ В для зручності побудови характеристик.

Примітка: У випадку насичення вхідного чи вихідного сигналу, потрібно зменшити амплітуду вхідного сигналу та повторити дослід.

- 1) Повторити в програмі Matlab виконані в попередньому пункті операції. **Важливо**, щоб вибрані значення вхідних даних в Arduino IDE та Matlab **співпадали!**

2) Після виконання всіх вимог потрібно натиснути на , що призведе до компіляції та завантаження програми у контролер.

3) Далі слід перейти в вікно програми Matlab і натиснути на . На екрані з'являться графіки вхідного (синій колір) та вихідного (зелений колір) сигналів об'єкта дослідження (рис. 1.20).

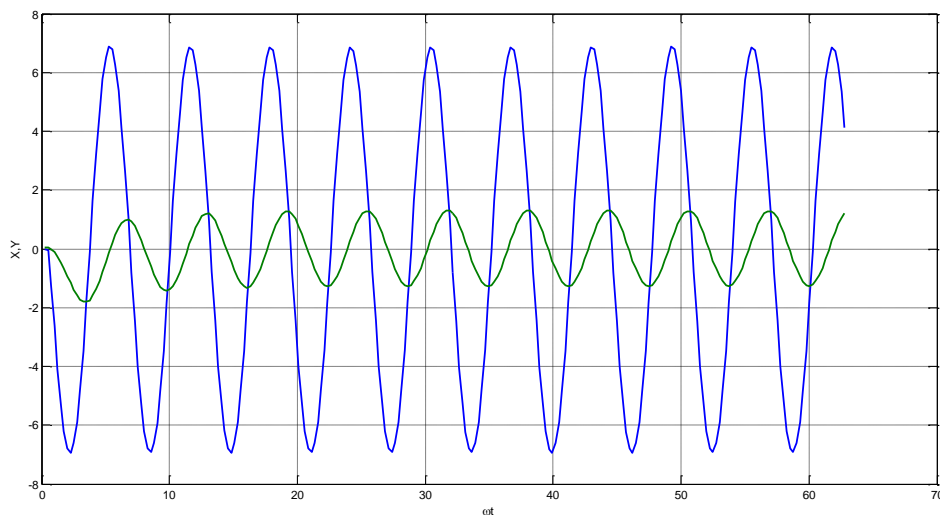



Рисунок 1.20 – Отримані графіки в Matlab

За допомогою сервісу, який має програмний пакет Matlab, ми вільно можемо заміряти амплітуди гармонік та їх фази. Вимірювати амплітуди та фази можна за допомогою маркерів. Для цього потрібно натиснути на  і поставити курсор у відповідне місце на графіку, клацнувши лівою кнопкою миші. Після цього з'явиться маркер, який можна переміщувати по всій кривій. Для того щоб використати ще один маркер, потрібно правою кнопкою миші клацнути на екрані та вибрати команду Create New Datatip і повторити ті ж самі дії. За допомогою висвітлених віконця на рисунку 1.21, ми можемо зафіксувати значення амплітуд та фаз сигналів.

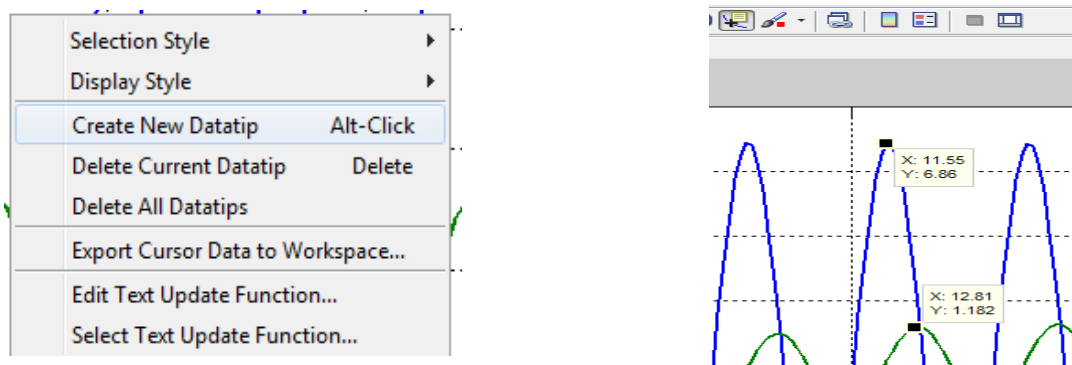


Рисунок 1.21 – Використання маркерів для точних замірів параметрів сигналів

4) Амплітуди вхідної та вихідної гармонік і зсув фаз потрібно внести до таблиці 1.3. Ці дані служитимуть для побудови характеристик, за якими студенти повинні дослідити об'єкт та розрахувати значення параметрів передатної функції ланки, зокрема сталої часу та коефіцієнта передачі.

Приклад таблиці/масиву для побудови характеристик:

```
w=[6.28; 12.56; 25.12; 50.24; 100.4; 200.9; 401.9; 502.4;628];
A1=[5.4; 5.4; 5.4; 5.4; 5.4; 5.4; 5.15; 5; 4.9]; A2=[5.3; 5.35; 5.54; 6.6; 8; 2.1; 0.5; 0.36;
0.18];
fi=-[0.03; 0.08; 0.12; 0.3; 1.47; 2.6; 3.02; 3.03; 3.14];
subplot(2,1,1); semilogx(w, 20*log10(A2./A1)); grid on;
subplot(2,1,2); semilogx(w,fi); grid on;
```

1.4.3 Експериментальні перехідні та частотні характеристики досліджуваних об'єктів отримуються за описаною в п. 1.4.1-1.4.2 методикою.

1.4.4 Експериментальні значення параметрів передатних функцій ОД отримуються за їх дослідними характеристиками. Зокрема визначаються параметри: для ОД1 – K, T в (1.1), для ОД2 – T в (1.2), для ОД3 – K, T_1, T_2 в (1.3), для ОД4 – K, T_3, T_4 в (1.7), для ОД5 – K, T, ξ, σ в (1.4)-(1.6). Отримані результати заносимо в табл. 1.4.

1.4.5 Теоретичні значення параметрів передатних функцій отримуються за відповідними виразами при врахуванні змінюваних залежно від варіанту лабораторної роботи значень опорів, що наведені в табл. 1.1-1.2. Зокрема тут використовуються вирази: для ОД1 – (1.8), для ОД2 – (1.9), для ОД3 – (1.10), для ОД4 – (1.11)-(1.14), для ОД5 – (1.15). Отримані результати заносимо в табл. 1.4.

1.4.6 Побудова теоретичних перехідних та частотних характеристик ОД здійснюється за їх розрахунковими передатними функціями шляхом використання команд *step* та *bode* системи *Matlab*.

Таблиця 1.4 – Результати дослідів

Номер об'єкта дослідження		
Назва ланки		
Теоретичні значення параметрів		
Експериментальні значення параметрів		

1.5 Зміст звіту

1.5.1 Мета роботи.

1.5.2 Схема лабораторної установки.

1.5.3 Програма досліджень.

1.5.4 Графіки експериментальних та теоретичних перехідних і логарифмічних частотних характеристик для кожного з досліджуваних ОД.

1.5.5 Визначені за експериментальними даними та розраховані теоретично параметри передатних функцій для кожного із досліджуваних ОД, які мають бути занесені в табл. 1.4.

1.5.6 Порівняння експериментальних та теоретичних характеристик ОД.

1.5.7 Висновки з лабораторної роботи.

1.6 Контрольні запитання

1.6.1 За якими ознаками класифікують ланки САК?

1.6.2 Назвіть часові характеристики динамічних ланок та систем.

1.6.3 Дайте визначення передатної функції ланки чи системи.

1.6.4 Наведіть передатні функції типових ланок (не менше 7-ми).

1.6.5 Наведіть перехідні характеристики типових ланок (не менше 7-ми).

1.6.6 Наведіть частотні характеристики типових ланок (не менше 7-ми).

1.6.7 Наведіть ЛАХ та ЛФХ типових ланок (не менше 7-ми).

1.6.8 Запишіть диференційні рівняння досліджених в роботі динамічних ланок.

1.6.9 Як впливає стала часу аперіодичної ланки на її швидкодію (на час перехідного процесу) і на вигляд частотних характеристик?

1.6.10 Як впливає коефіцієнт затухання ξ коливальної ланки на її характеристики?

1.6.11 Як за логарифмічними частотними характеристиками ланки можна оцінити її швидкодію?

1.6.12 Як за перехідною характеристикою аперіодичної ланки 1-го порядку визначити параметри її передатної функції?

- 1.6.13 Як за ЛАХ аперіодичної ланки 1-го порядку визначити параметри її передатної функції?
- 1.6.14 Як за перехідною характеристикою аперіодичної ланки 2-го порядку визначити параметри її передатної функції?
- 1.6.15 Як за ЛАХ аперіодичної ланки 2-го порядку визначити параметри її передатної функції?
- 1.6.16 Як за перехідною характеристикою реальної диференціювальної ланки визначити параметри її передатної функції?
- 1.6.17 Як за ЛАХ реальної диференціювальної ланки визначити параметри її передатної функції?
- 1.6.18 Як за перехідною характеристикою коливальної ланки визначити параметри її передатної функції?
- 1.6.19 Як отримати АФХ ланки за її передатною функцією?
- 1.6.20 Як експериментальним способом визначити АФХ ланки?
- 1.6.21 Як експериментальним способом визначити ЛАХ та ЛФХ ланки?
- 1.6.22 Наведіть перехідну характеристику, ЛАХ та ЛФХ інтегро-диференціювальної ланки, де домінують диференційні властивості.
- 1.6.23 Наведіть перехідну характеристику, ЛАХ та ЛФХ інтегро-диференціювальної ланки, де домінують інтегральні властивості.

Література

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., – СПб, Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
3. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / В.А. Бесекерский [и др.]. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
4. Теорія автоматичного керування : Частина I : Курс лекцій / Уклад. М.Г. Попович, Б.І. Приймак. – К.: НТУУ "КПІ", 2010. – 182 с. – Режим доступу: <http://library.kpi.ua:8080/handle/123456789/770>
5. Control System Toolbox. User's Guide, The MathWorks, Release 2009b, 2009.

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Мета роботи: закріплення теоретичних знань про властивості систем автоматичного регулювання (САР) у статичних та усталених динамічних процесах за наявності типових зовнішніх дій, а також набуття практичних навичок з розрахунку та експериментального визначення показників точності САР.

Тривалість лабораторної роботи – 4 год.

Тривалість самостійної роботи – 4 год.

2.1 Короткі теоретичні відомості

2.1.1 Показники якості систем автоматичного керування

До процесів керування висуваються три основних вимоги: стійкість, точність в усталених режимах і якість перехідних процесів. Точність в усталених режимах при незмінному значенні вхідної дії (в системах стабілізації) оцінюється статичною помилкою

$$\Delta = x_0 - x_{уст},$$

де x_0 – задане значення регульованої величини; $x_{уст}$ – усталене значення регульованої величини після закінчення перехідного процесу, зумовленого постійним збуренням $f(t) = const$.

Статична помилка на одиницю збурення

$$\delta = \frac{\Delta}{f}$$

є мірою точності в статичному режимі і називається статизмом. Для статичних систем, зведених до одноконтурного вигляду, статизм визначається за формулою

$$\delta = \frac{K_{fx}}{1 + K_{\Sigma}},$$

де K_{fx} – добуток коефіцієнтів передачі ланок системи, які містяться між місцем прикладання збурення f і виходом системи; K_{Σ} – коефіцієнт передачі розімкнутої системи (добуток коефіцієнтів передачі усіх ланок одноконтурної системи, які утворюють замкнутий контур регулювання).

Якщо система після зведення до одноконтурного вигляду містить інтегровальну ланку (астатична система), яка знаходиться між місцем прикладання збурення і виходом, то статизм системи

$$\delta = \frac{K_{fx}}{K_{\Sigma}}.$$

Якщо в одноконтурній системі інтегровальна ланка знаходиться перед точкою прикладання збурення, то $\delta = 0$.

2.1.2 Типові усталені режими роботи систем

За характером зовнішніх дій на систему, якими є завдання $g(t)$ та збурення $f(t)$, розрізняють наступні типові режими роботи САР.

Статичний режим – режим, при якому всі зовнішні дії, прикладені до системи, керована величина і всі змінні стану системи не змінюються. У цьому режимі

$$f(t) = \text{const}; \quad g(t) = \text{const}. \quad (2.1)$$

Усталений динамічний режим – режим, при якому зовнішні дії (завдання та збурення) змінюються за певним законом. Ці режими характерні для стежних (слідкувальних) і програмних САР. Розрізняють наступні типові закони зміни зовнішніх дій:

а) дія змінюється з *постійною швидкістю* $f = vt$ або $g = vt$, де v – швидкість. Тоді

$$\frac{df}{dt} = pf = v = \text{const} \quad \text{або} \quad \frac{dg}{dt} = pg = v = \text{const}, \quad (2.2)$$

і при цьому $f = v/p$; $g = v/p$.

б) дія змінюється з *постійним прискоренням* $g = at^2/2$ або $f = at^2/2$, де a – прискорення. Тоді

$$\frac{d^2 g}{dt^2} = p^2 g = a = const \text{ або } \frac{d^2 f}{dt^2} = p^2 f = a = const, \quad (2.3)$$

і при цьому $g = a/p^2$; $f = a/p^2$.

в) дія змінюється за *гармонічним законом*

$$g(t) = g_{\max} \sin \omega_k t, \quad (2.4)$$

де g_{\max} – амплітудне значення, ω_k – частота сигналу. При цьому в усталеному динамічному режимі помилка стежної або програмної системи змінюватиметься з тією ж частотою, але з деяким зсувом за фазою

$$\Delta x(t) = \Delta x_{\max} \sin(\omega_k t + \varphi).$$

2.1.3 Визначення усталених динамічних помилок САР. Метод коефіцієнтів

ПОМИЛОК

Даний метод набув широкого поширення, особливо для дослідження стежних і програмних САР, які функціонують при змінних вхідних діях (завданнях). Він базується на тому положенні, що функції зовнішніх дій диференційовні, а похідні дій з часом зменшуються, тобто процес в САР є затухаючим.

Нехай зображення відхилення регульованої величини від заданого значення, що по суті є помилкою в системі стабілізації, має вигляд:

$$\Delta x(p) = W_f(p) \Delta f(p) = \frac{W_1^f(p)}{1 + W(p)} \Delta f(p) \quad (2.5)$$

де $W_1^f(p)$ – передатна функція об'єкта за збуренням, $W(p)$ – передатна функція розімкнутої системи.

Розкладемо передатну функцію замкнутої системи в степеневий ряд Маклорена:

$$W_f(p) = C_0 + C_1 p + \frac{C_2}{2!} p^2 + \dots + \frac{C_n}{n!} p^n.$$

При цьому зображення помилки матиме вигляд

$$\Delta x(p) = (C_0 + C_1 p + \frac{C_2}{2!} p^2 + \dots + \frac{C_n}{n!} p^n) \Delta f(p).$$

Переходячи до оригіналу помилки, отримаємо

$$\Delta x(t) = C_0 \Delta f(t) + C_1 \frac{d\Delta f(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} \frac{d^2 \Delta f(t)}{dt^2} + \dots + \frac{C_n}{n!} \frac{d^n \Delta f(t)}{dt^n}. \quad (2.6)$$

З рівняння (2.6) видно, що помилка системи має низку складових, які, окрім першої складової $C_0 \Delta f(t)$, виявляються лише при зміні збурення.

У рівнянні помилки (2.6) коефіцієнти $C_0, C_1 \dots C_n$ називають *коефіцієнтами помилок*: C_0 – *коефіцієнт статичної помилки*; C_1 – *коефіцієнт швидкісної помилки*; C_2 – *коефіцієнт помилки за прискоренням*; C_3 – *коефіцієнт помилки за рівномірним рухом* і т. д.

Для стежної або програмної системи рівняння величини розузгодження виглядатиме як

$$\varepsilon(t) = C_0 \Delta g(t) + C_1 \frac{d\Delta g(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} \frac{d^2 \Delta g(t)}{dt^2} + \dots + \frac{C_n}{n!} \frac{d^n \Delta g(t)}{dt^n}. \quad (2.7)$$

Отже можемо зазначити, що у загальному випадку коефіцієнти помилок від певної дії, прикладеної до САР, можна визначити за передатною функцією замкнутої системи щодо даної дії шляхом ділення многочлена чисельника цієї функції на многочлен її знаменника.

Розглянемо методику визначення коефіцієнтів помилок на конкретному прикладі. Нехай на схемі САР, що зображена на рис. 2.1, об'єкт $W_1(p)$ і регулятор $W_2(p)$ є аперіодичними ланками 1-го порядку з передатними функціями

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1}; \quad W_2(p) = \frac{K_2}{T_1 p + 1}.$$

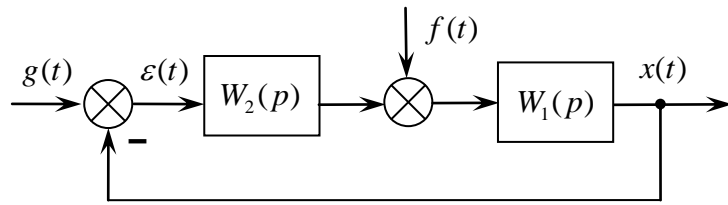


Рисунок 2.1 – Структурна схема САР

Визначимо передатну функцію системи стеження за помилкою:

$$W_{\varepsilon}(p) = \frac{\varepsilon(p)}{g(p)} = \frac{1}{1 + W_1(p)W_2(p)} = \frac{1}{1 + \frac{K_1 K_2}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}} =$$

$$= \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) + K_1 K_2} = \frac{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1 + K_1 K_2}.$$

Розділимо многочлен чисельника на многочлен знаменника, розмістивши складові за зростанням показника степеня оператора p . Отримаємо

$$\begin{array}{c|c} \frac{1 + (T_1 + T_2)p + T_1 T_2 p^2}{1 + \frac{(T_1 + T_2)}{1 + K_1 K_2} p + \frac{T_1 T_2}{1 + K_1 K_2} p^2} & \frac{(1 + K_1 K_2) + (T_1 + T_2)p + T_1 T_2 p^2}{\frac{1}{1 + K_1 K_2} + \frac{(T_1 + T_2) K_1 K_2}{(1 + K_1 K_2)^2} p + \left(\frac{T_1 T_2 K_1 K_2}{(1 + K_1 K_2)^2} - \frac{(T_1 + T_2)^2 K_1 K_2}{(1 + K_1 K_2)^3} \right) p^2 \dots} \\ \hline \frac{(T_1 + T_2) \left(\frac{K_1 K_2}{1 + K_1 K_2} \right) p + T_1 T_2 \left(\frac{K_1 K_2}{1 + K_1 K_2} \right) p^2}{(T_1 + T_2) \left(\frac{K_1 K_2}{1 + K_1 K_2} \right) p + \left(\frac{(T_1 + T_2)^2 K_1 K_2}{(1 + K_1 K_2)^2} \right) p^2 + \left(\frac{T_1 T_2 (T_1 + T_2) K_1 K_2}{(1 + K_1 K_2)^2} \right) p^3} & \left(\frac{T_1 T_2 K_1 K_2}{(1 + K_1 K_2)} - \frac{(T_1 + T_2)^2 K_1 K_2}{(1 + K_1 K_2)^2} \right) p^2 + \dots \end{array}$$

Відповідно до вищевикладеного можна визначити коефіцієнти помилок у даній системі:

$$C_o = \frac{1}{1 + K_1 K_2} \neq 0 \quad - \quad \text{система статична}; \quad C_1 = \frac{(T_1 + T_2) K_1 K_2}{(1 + K_1 K_2)^2};$$

$$\frac{C_2}{2} = \frac{T_1 T_2 K_1 K_2}{(1 + K_1 K_2)^2} - \frac{(T_1 + T_2)^2 K_1 K_2}{(1 + K_1 K_2)^3}.$$

Підставляючи відшукані значення коефіцієнтів помилок у рівняння помилки стеження (2.7) і диференціюючи завдання $g(t)$, можна отримати відповідні складові помилки, підсумувавши які неважко визначити її результуюче значення $\varepsilon(t)$.

Розглянемо вплив інтегровальних ланок на точність САР. Нехай передатна функція замкнутої системи за збуренням до введення інтегровальної ланки має вигляд

$$W_f(p) = \frac{\Delta x}{\Delta f} = \frac{W_1^f(p)}{1 + W(p)},$$

де $W_1^f(p)$ – передатна функція об'єкта за збуренням, $W(p) = W_1(p)W_2(p)$ – передатна функція розімкнутої системи, де $W_1(p), W_2(p)$ – відповідно передатні функції об'єкта та регулятора, які не мають нульових полюсів. Статична помилка

$$\Delta x_{\text{ст}} = \left. \frac{W_1^f(p)}{1 + W(p)} \right|_{p=0} \Delta f \neq 0. \text{ Після введення інтегровальної ланки } W_i(p) = k/p$$

передатна функція розімкненої системи буде

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_i(p) = W(p) \frac{k}{p}. \text{ В цьому випадку статична помилка}$$

$$\Delta x_{\text{ст}} = \left. \frac{W_1^f(p)}{1 + W(p) \frac{k}{p}} \right|_{p=0} \cdot \Delta f = \left. \frac{W_1^f(p)p}{p + W(p)k} \right|_{p=0} \cdot \Delta f = 0.$$

Тобто введення інтегровальної ланки дозволяє повністю усунути статичну похибку, та перетворити статичну систему на астатичну.

При цьому слід мати на увазі, що інтегровальну ланку $W_i(p)$ потрібно вводити в структуру так, як показано на рис. 2.2, тобто на вході об'єкта до точки прикладення збурення f , що діє на об'єкт.

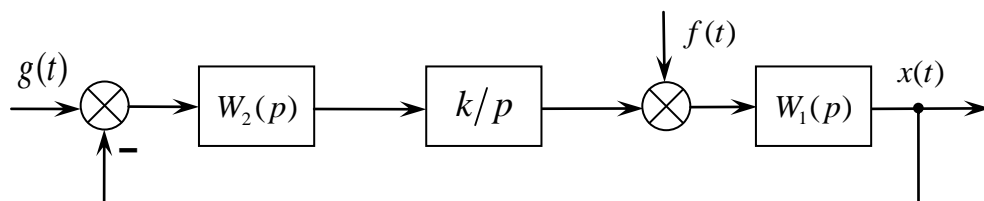


Рисунок 2.2 – Структурна схема астатичної за збуренням САР

Якщо інтегровальну ланку ввести в САР після точки дії збурення, то, розглядаючи систему стабілізації ($g(t)=0$), отримаємо передатну функцію за збуренням з врахуванням введення інтегровальної ланки $W_i(p) = k/p$ у вигляді

$$W_f(p) = \frac{W_i(p)W_1(p)}{1+W(p)W_i(p)} = \frac{k \frac{1}{p} W_1(p)}{1+W_1(p)W_2(p)\frac{k}{p}} = \frac{kW_1(p)}{p+W_1(p)W_2(p)k}.$$

Статична помилка системи за збуренням тут дорівнюватиме

$$\Delta x_{ст} = W_f(p) \Delta f = \left. \frac{k W_1(p)}{p+W_1(p)W_2(p)k} \right|_{p=0} \Delta f = \frac{W_1(0)}{W_1(0)W_2(0)} \Delta f \neq 0,$$

що говорить про неможливість ліквідації статичної помилки при вказаному на рис.

2.3 вмиканні інтегровальної ланки (між точкою прикладання збурення та об'єктом).

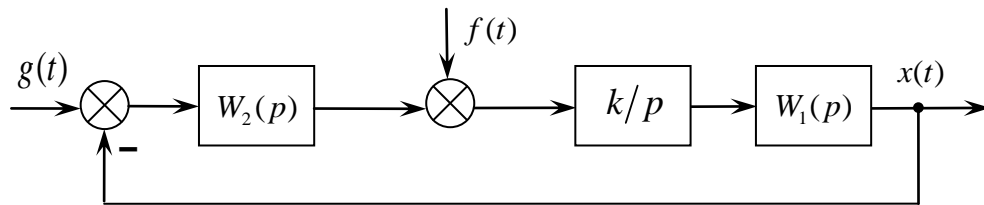


Рисунок 2.2 – Структурна схема статичної за збуренням САР

Введення інтегровальних ланок з метою ліквідації статичної та усталених динамічних помилок називають *введенням астатизму* в систему.

При одній інтегровальній ланці це астатизм 1-го порядку, при двох таких ланках – астатизм 2-го порядку і так далі. Введення астатизму другого та вищих порядків дозволяє ліквідувати усталені динамічні помилки, що виникають в системі при зміні зовнішніх дій в усталених динамічних режимах роботи.

Тут слід пам'ятати, що при введенні в систему з аперіодичними і підсилювальними ланками двох і більше інтегровальних ланок система перетворюється на структурно-нестійку. Для усунення структурної нестійкості інтегровальну ланку доповнюють пропорційним паралельним прямим зв'язком $W_n(p) = k'$. Таку ланку називають *ізодромною інтегровальною* або просто *ізодромною*. Її передатна функція матиме вигляд

$$W_i(p) = k' + \frac{k}{p} = \frac{k'p+k}{p}.$$

Таким чином введення в САР однієї інтегрувальної ланки дозволяє отримати астатизм 1-го порядку, а значить статичну систему перетворити в астатичну. Введення інтегрувальної та ізодромної ланок (або двох ізодромних) дозволяє отримати в САР астатизм 2-го порядку та усуває статичну і швидкісну помилки.

Усунення помилки за прискоренням ($C_2 = 0$) можливе при встановленні в системі астатизму 3-го порядку за допомогою додаткової ізодромної ланки. Аналогічним чином в САР можна позбутися і помилок вищих порядків.

2.1.4 Точність систем в усталених динамічних режимах

Режим зміни збурення зі сталою швидкістю. Розглянемо роботу САР у режимі зміни збурення з постійною швидкістю. У цьому випадку $f = vt$, похідна збурення $df/dt = v = \text{const}$ або $pf = v$, тому $f = v/p$.

Вираз для статичної помилки за збуренням матиме вигляд

$$\Delta x_{\text{уст}} = W_f(p)f = \left| \frac{W_1^f(p)}{1 + W(p)} \frac{v}{p} \right|_{p=0}.$$

У статичній системі $W_1^f(0) = K_{fo}$, $W(0) = K_\Sigma$ і тоді

$$\Delta x_{\text{уст}} = \left| \frac{K_{fo}}{(1 + K_\Sigma)} \frac{v}{p} \right|_{p=0} = \infty.$$

Звідки випливає, що в статичній системі при зміні вхідної величини (збурення) з постійною швидкістю помилка системи безперервно зростає. Для припинення безперервного зростання помилки і встановлення її на деякому прийнятному, постійному рівні необхідно ввести астатизм в дану систему.

При введенні астатизму 1-го порядку нова передатна функція розімкнутої системи матиме вигляд

$$W'(p) = \frac{1}{p} W(p).$$

Якщо введемо інтегрувальну ланку до точки прикладання збурення до об'єкта, то отримаємо передатну функцію об'єкта за збуренням $W_1^f(p)$. При $p=0$ матимемо $W_1^f(p) = K_{fo}$, після чого

$$\Delta x_{уст} = \left| \frac{K_{fo}}{(1 + \frac{1}{p} K_{\Sigma})} \frac{v}{p} \right|_{p=0} = \left| \frac{K_{fo}}{(\frac{p + K_{\Sigma}}{p})} \frac{v}{p} \right|_{p=0} = \frac{K_{fo} v}{K_{\Sigma}} = \text{const}.$$

Відношення $\frac{v}{\Delta x_{уст}} = K_v$ називають *добротністю системи за швидкістю*. В

даному випадку $K_v = K_{\Sigma}/K_{fo}$.

Фізичний сенс поняття "добротність системи за швидкістю" в тому, що вона дорівнює швидкості зміни збурення при якій усталене відхилення вихідної величини дорівнює одиниці, тобто $K_v = v$ при $\Delta x_{уст} = 1$.

Для стежних та програмних систем значення помилки обчислюється за формулою

$$\varepsilon(t) = g(t) - x(t)W_{33}(p),$$

де $W_{33}(p)$ – передатна функція основного зворотного зв'язку, $g(t)$ – завдання.

Передатна функція за помилкою при наявності інтегрувальної ланки, що описується як $W_i(p) = k/p$, має вигляд

$$W_{\varepsilon}(p) = \frac{\varepsilon(p)}{g(p)} = \frac{1}{1 + W(p)k \frac{1}{p}}.$$

Усталене значення помилки у даному випадку при зміні завдання з постійною швидкістю $g = vt$ можна визначити як

$$\varepsilon_{уст} = \left| \frac{1}{1 + W(p) \frac{k}{p}} \frac{v}{p} \right|_{p=0} = \left| \frac{1}{p + K_{\Sigma}} v \right|_{p=0} = \frac{v}{K_{\Sigma}},$$

де $W(0)k = K_{\Sigma}$. Отже, в даному випадку добротність системи за швидкістю дорівнюватиме $K_v = K_{\Sigma}$. Вона пов'язана із коефіцієнтом швидкісної помилки системи як $K_v = 1/C_1$.

Режим зміни збурення зі сталим прискоренням. Розглянемо роботу САР у режимі зміни збурення зі сталим прискоренням. У цьому випадку $f = at^2/2$, друга похідна збурення $d^2f/dt^2 = a = \text{const}$ або $p^2f = a$, звідси $f = a/p^2$. Вираз для статичної помилки за збуренням матиме вигляд

$$\Delta x_{\text{уст}} = W_f(p)f = \left| \frac{W_1^f(p)}{1 + W(p)} \frac{a}{p^2} \right|_{p=0}.$$

У статичній системі $W_1^f(0) = K_{fo}$, $W(0) = K_{\Sigma}$. Отже

$$\Delta x_{\text{уст}} = \left| \frac{K_{fo}}{(1 + K_{\Sigma})} \frac{a}{p^2} \right|_{p=0} = \infty.$$

При введенні в систему астатизму 2-го порядку нова передатна функція розімкнutoї системи матиме вигляд

$$W'(p) = \frac{1}{p^2} W(p).$$

У цьому разі

$$\Delta x_{\text{уст}} = \left| \frac{W_1^f(p)}{1 + \frac{1}{p^2} W(p)} \frac{a}{p^2} \right|_{p=0} = \left| \frac{K_{fo} a}{p^2 + K_{\Sigma}} \right|_{p=0} = \frac{K_{fo}}{K_{\Sigma}} a = \text{const}.$$

де відношення $\frac{a}{\Delta x_{\text{уст}}} = K_a$ називають *добротністю системи за прискоренням*. В

даному випадку $K_a = K_{\Sigma}/K_{fo}$.

Фізичний сенс поняття "добротність системи за прискоренням" в тому, що вона дорівнює прискоренню змінювання зовнішньої дії при якому усталене відхилення вихідної величини дорівнює одиниці, тобто $K_a = a$ при $\Delta x_{\text{уст}} = 1$.

Коли добротність за прискоренням системи має скінченне значення, то добротність цієї системи за швидкістю дорівнює нескінченності, а усталене відхилення

вихідної величини при змінюваному зі сталою швидкістю збуренні дорівнює нулю. Математично це можна записати як

$$\Delta x_{\text{уст}} = \left| \frac{K_{fo}}{1 + \frac{1}{p^2} K_{\Sigma}} \frac{v}{p} \right|_{p=0} = 0.$$

Для стежної системи усталене значення помилки при зміні завдання з постійним прискоренням $g = at^2/2$ можна визначити як

$$\varepsilon_{\text{уст}} = \left| \frac{1}{1 + W(p) \frac{k}{p^2}} \frac{a}{p^2} \right|_{p=0} = \left| \frac{1}{p^2 + K_{\Sigma}} a \right|_{p=0} = \frac{a}{K_{\Sigma}},$$

де $W(0)k = K_{\Sigma}$. Отже, в даному випадку добротність системи за прискоренням дорівнюватиме $K_a = K_{\Sigma}$. Вона пов'язана із коефіцієнтом помилки системи за прискоренням як $K_a = 2/C_2$.

2.2 Опис лабораторної установки

2.2.1 Апаратна та програмна частини лабораторної установки

Лабораторна установка (ЛУ) являє собою комп'ютеризований апаратно-програмний комплекс, що призначений для дослідження властивостей САР в установлених режимах роботи. Для функціонування ЛУ необхідним є персональний комп'ютер з програмним середовищем у вигляді Matlab версії «R2013a» чи вищої.

Загальний вигляд ЛУ показано на рис. 2.4.

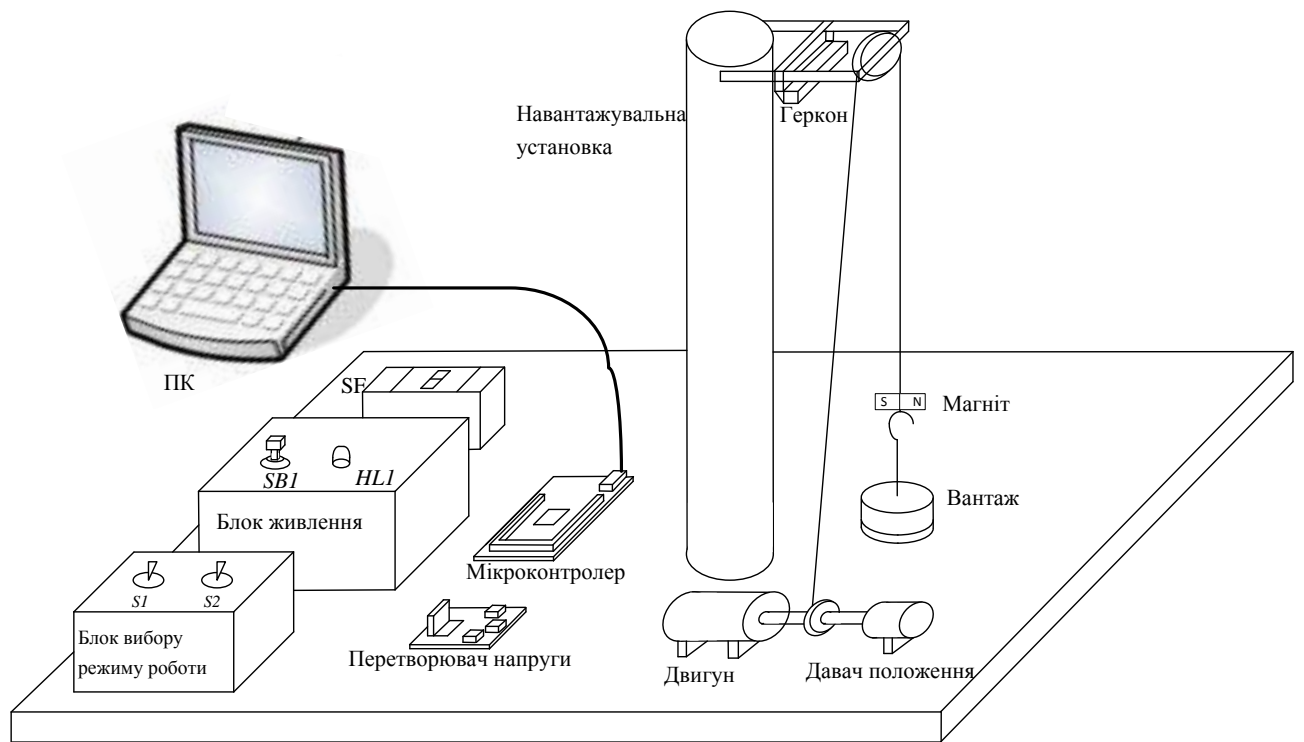


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд лабораторної установки

Ця установка забезпечує можливість реалізації двох варіантів САР положення вала електричного двигуна. Електромеханічна частина ЛУ складається з мікро-двигуна постійного струму, що збуджується від постійних магнітів та оснащеного механічним редуктором. Вихідний вал редуктора з'єднаний з давачем положення, а також на ньому закріплена котушка для намотування нитки підйомної навантажувальної установки (НУ).

Призначенням НУ є створення необхідного для дослідів моменту опору на валу двигуна шляхом встановлення відповідної ваги підйомного вантажу, який набирається із тарованих важків. Апаратний захист від підняття вантажу вище допустимого рівня реалізується за допомогою магніту та геркону при зближенні яких останній розмикає коло живлення двигуна.

Перетворювач напруги (ПН) забезпечує живлення якірного кола двигуна регульованою напругою постійного струму відповідної полярності та значення.

На рис. 2.5 наведена принципова схема ЛУ.

Робоча програма ЛУ включає simulink-частину та мікроконтролерну частину (МК-програма). Робоча програма установки являє собою програму реального часу, яка реалізована в програмному пакеті Matlab/Simulink на основі наявних в ньому бібліотечних модулів. Вона призначена для вирішення наступних завдань:

- 1) регулювання кутового положення двигуна в реальному часі з можливістю застосування двох типів регуляторів; 2) формування типових зовнішніх дій для САР положення двигуна; 3) оцінювання не вимірюваних змінних стану об'єкта керування; 4) візуалізація отриманих в процесі досліджень даних та їх запис у пам'ять та на диск комп'ютера.

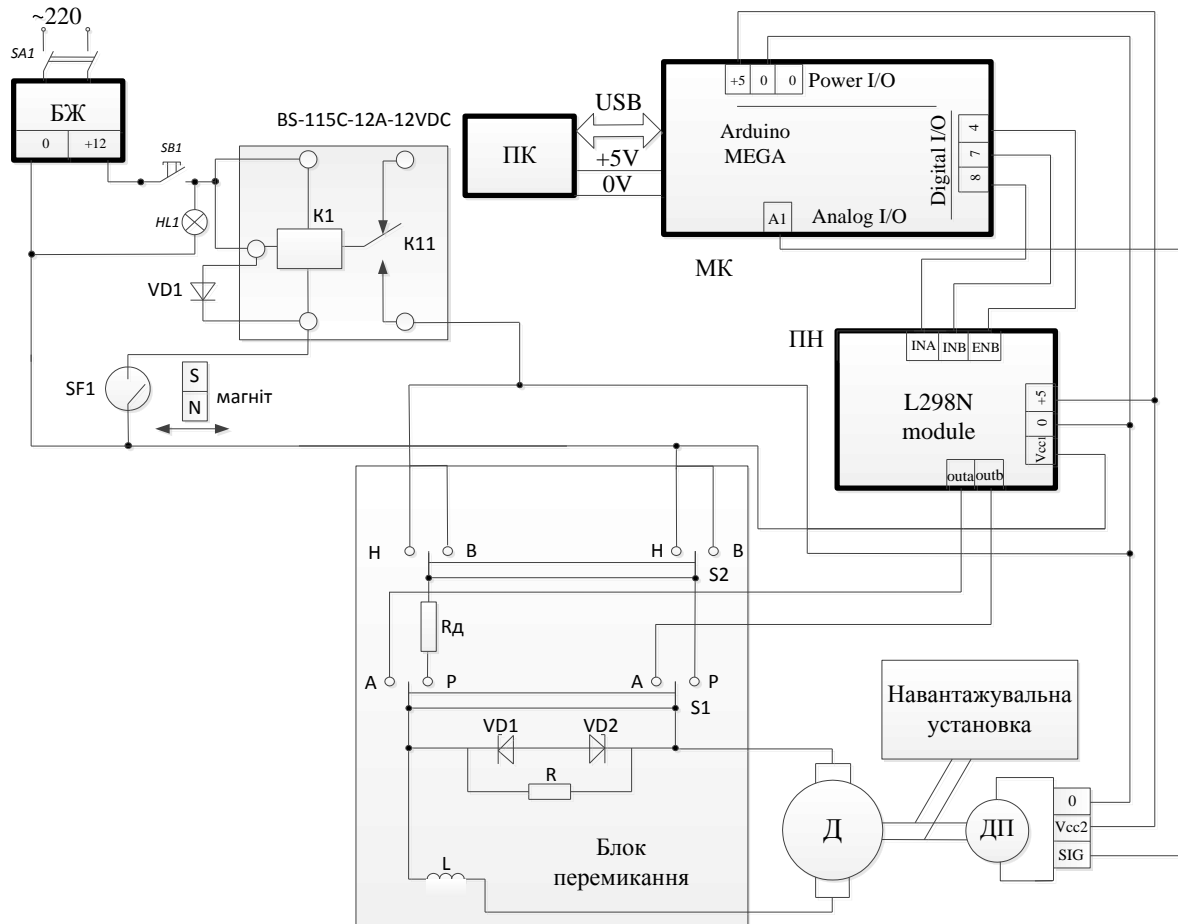


Рисунок 2.5 – Принципова електрична схема лабораторної установки

МК-програма лабораторної установки вирішує наступні завдання: 1) здійснення комутації силових ключів перетворювача напруги на основі широтно-імпульсно модульованого сигналу керування, отриманого від комп'ютера; 2) зчитування даних з давача кутового положення двигуна, реалізація аналого-цифрового перетворення та пересилання сигналу положення двигуна в комп'ютер.

Блок-схема робочої програми ЛУ зображена на рис.2,6. Робоча програма складається із наступних, створених у Simulink підсистем: блок формування завдання (Б1); блок регуляторів положення (Б2); блок зв'язку з перетворювачем на-

пруги (Б3); блок оцінювання швидкості та струму (Б4); блок зв'язку з давачем положення двигуна (Б5); блок візуалізації та запису даних (Б6). Віртуальний перемикач S1 замикає та розмикає контур зворотного зв'язку в САР.

На вході Б1 розташовані елементи для встановлення наступних параметрів задавальної дії $g(t)$ на вході САР: s – амплітуди в стрибкоподібному завданні $g=s \cdot 1(t)$; v – швидкості в лінійному завданні $g=vt$; a – прискорення в квадратичному завданні $g=at^2/2$; v_sat – швидкості в лінійному завданні з обмеженням положення $g=sat(v_sat \cdot t)$. Дисплейні елементи на схемі робочої програми показують точні значення змінних в процесі виконання дослідів.

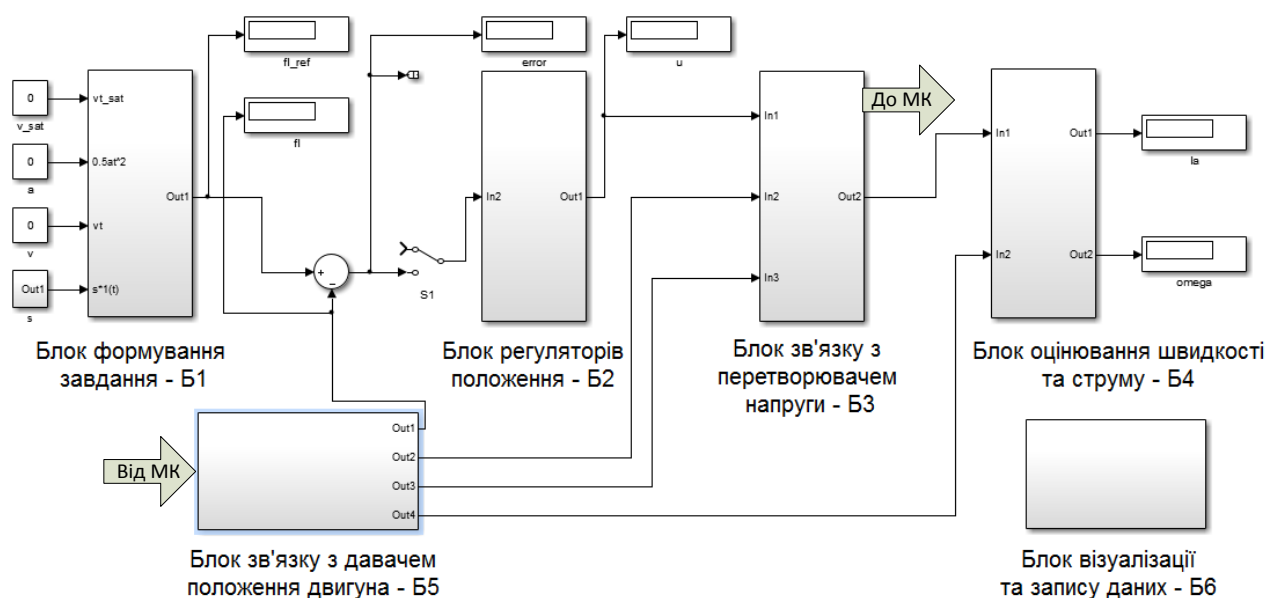


Рисунок 2.6 – Блок-схема робочої програми лабораторної установки

При здійсненні експериментів в Б6 забезпечується візуалізація за допомогою електронних осцилографів Score за запис у робочий простір Workspace наступних змінних та їх ідентифікаторів: завдання для САР g ($f1_ref$); кутове положення двигуна φ ($f1$); помилка САР Δ ($error$); керувальна дія на виході регулятора u (u); швидкість двигуна ω ($omega$); струм якоря двигуна I_a (Ia); час t ($time$).

Основні характеристики ЛУ є наступними.

Напруга живлення – однофазна 220 В, 50 Гц.

Споживаний струм – не більше 2 А.

Рекомендовані значення швидкостей двигуна – $1 \div 10$ рад/с.

Рекомендовані значення прискорень двигуна – $0.5 \div 1.5$ рад/с².

Робоча зона обертання двигуна – 50 рад.

Максимально допустима зона обертання двигуна – 62.8 рад.

Захист від виходу за межі робочої зони – програмний та апаратний.

Максимальна вага вантажу підйомної установки – 0.6 кг.

2.2.2 Описання досліджуваних САР

На основі ЛУ реалізується два варіанти САР кутового положення вала двигуна, структурна схема якої зображена на рис. 2.7. На схемі позначено: $g(t)$ – задавальна дія; ω, φ – зведені до виходу редуктора кутові швидкість та положення двигуна; Δ – помилка САР; I_a – струм якоря двигуна; u – керувальна дія; U_a – напруга якоря; f – збурювальна дія, що відповідає струму навантаження I_n ;

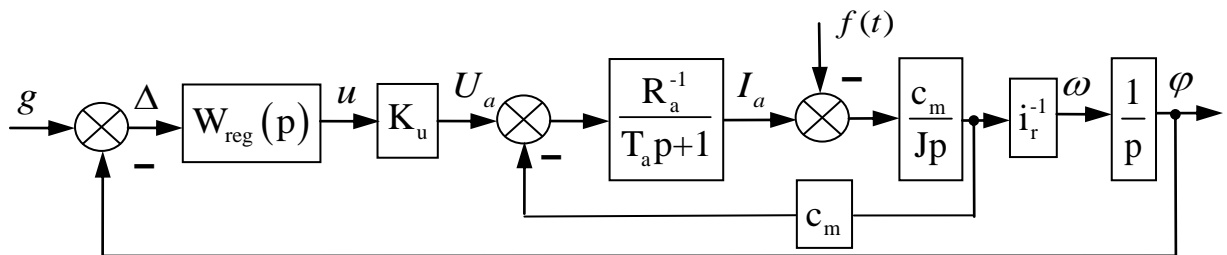


Рисунок 2.7 – Структурна схема САР положення двигуна

R_a, T_a – опір та стала часу якоря; J – сумарний момент інерції привода; K_u – коефіцієнт передачі перетворювача напруги з ШІМ; c_m – постійний коефіцієнт; i_r – передатне число редуктора; $W_{reg}(p)$ – передатна функція регулятора.

Номінальні значення параметрів САР дорівнюють:

$K_u = 0.047$ В/о.к. (о.к. – одиниці коду в комп'ютері, що визначають тривалість імпульсу в періоді ШІМ); $R_a = 10.5$ Ом; $T_a = 0.003$ с; $c_m = 0.0065$ В·с/рад; $J = 1.32 \cdot 10^{-6}$ кг·м²; $i_r = 43.7$; $K_0 = K_u c_m^{-1} i_r^{-1} \approx 0.17$ рад·с⁻¹/о.к., де K_0 – коефіцієнт передачі об'єкта керування. Сумарний коефіцієнт передачі розімкнутої системи дорівнює $K_\Sigma = K_{reg} K_0$.

Номинальні значення параметрів струму, напруги та моменту двигуна відповідно дорівнюють

$$I_{a,ном} = 0.8 \text{ A}; \quad U_{a,ном} = 12 \text{ В}; \quad M_{ном} = I_{a,ном} \cdot c_m = 5.2 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При дослідженні САР використовується два типи регуляторів – статичний та астатичний. Статичний регулятор (П-регулятор) має ПФ

$$W_{\text{reg}}(p) = K_{\text{reg}} \quad (2.8)$$

Астатичний регулятор (ІІ-регулятор) описується ПФ

$$W_{\text{reg}}(p) = K_{\text{reg}} (T_i p + 1) / p \quad (2.9)$$

Помилка САР за наявності двох зовнішніх дій згідно з принципом суперпозиції буде сумою двох складових

$$\Delta = \Delta_f + \Delta_g, \quad (2.10)$$

де Δ_f, Δ_g – складові помилки від дії збурення та завдання відповідно. Запишемо формули для обчислення усталених значень складових помилки системи.

Виходячи із структури САР, отримаємо її ПФ за збуренням у вигляді

$$W_f(p) = \frac{\Phi}{f} = - \frac{(T_a p + 1) c_m i_r^{-1}}{J T_a p^3 + J p^2 + R_a^{-1} c_m^2 p + W_{\text{reg}}(p) K_u R_a^{-1} c_m i_r^{-1}}. \quad (2.11)$$

Складові помилки системи від збурення дорівнює $\Delta_f = g - \varphi = 0 - \varphi = -\varphi$. При статичному регуляторі з ПФ (2.8) та постійному збуренні $f = I_n = \text{const}$ матимемо

$$\Delta_f = W_f(p) I_n|_{p=0} = \frac{K_{f0}}{K_{\Sigma}} I_n, \quad (2.12)$$

де $K_{f0} = R_a c_m^{-1} i_r^{-1}$ – коефіцієнт передачі об'єкта за збуренням.

Із структурної схеми отримаємо ПФ системи за помилкою у вигляді

$$W_{\Delta}(p) = \frac{\Delta}{g} = \frac{(J T_a p^2 + J p + R_a^{-1} c_m^2) p}{J T_a p^3 + J p^2 + R_a^{-1} c_m^2 p + W_{\text{reg}}(p) K_u R_a^{-1} c_m i_r^{-1}}. \quad (2.13)$$

При статичному регуляторі та лінійному завданні $g = v/p$ усталене значення складової помилки системи дорівнюватиме

$$\Delta_g = W_{\Delta}(p) v p^{-1}|_{p=0} = v / K_{\Sigma} \quad (2.14)$$

При астатичному регуляторі (2.9) отримаємо ПФ системи за збуренням у вигляді

$$W_f(p) = - \frac{p(T_a p + 1) c_m i_r^{-1}}{J T_a p^4 + J p^3 + R_a^{-1} c_m^2 p^2 + K_{reg} T_i K_u R_a^{-1} c_m i_r^{-1} p + K_{reg} K_u R_a^{-1} c_m i_r^{-1}}.$$

Для $f = const$ статична помилка системи $\Delta_f = W_f(p) I_n|_{p=0} = 0$, що засвідчує наявність в САР астатизму першого порядку за збуренням.

Система з астатичним регулятором матиме ПФ за помилкою

$$W_\Delta(p) = - \frac{(J T_a p^2 + J p + R_a^{-1} c_m^2) p^2}{J T_a p^4 + J p^3 + R_a^{-1} c_m^2 p^2 + K_{reg} T_i K_u R_a^{-1} c_m i_r^{-1} p + K_{reg} K_u R_a^{-1} c_m i_r^{-1}}.$$

При квадратичному завданні $g = a/p^2$ помилка $\Delta_g = W_\Delta(p) a p^{-2}|_{p=0} = a/K_\Sigma$.

2.3 Програма досліджень

2.3.1 Вивчити принцип роботи та характеристики ЛУ.

2.3.2 За методом коефіцієнтів помилок визначити аналітично перші три коефіцієнти помилок за завданням та за збуренням для описаних в розділі 2.2.2 САР. За коефіцієнтами помилок визначити статизм δ та добротності за швидкістю K_v і за прискоренням K_a цих систем.

2.3.3 Визначити експериментально коефіцієнт передачі об'єкта керування K_0 та порівняти його із розрахунковим значенням.

2.3.4 Дослідити властивості САР зі статичним регулятором положення при відпрацюванні лінійного завдання $g = vt$. Значення швидкості v та коефіцієнта передачі регулятора K_{reg} кожній бригаді студентів слід взяти з табл. 2.1 для вказаного викладачем варіанту.

Таблиця 2.1 – Значення v та K_{reg} для виконання п. 2.3.4

Варіант	1	2	3	4	5	6
v , рад/с	3; 5; 8	4; 6; 9	5; 7; 9	3.5; 6; 8	4; 7; 9	5; 8; 10
K_{reg} , о.к./рад	30;40;50	25;35;45	20;30;40	25;40;50	30;45;55	20;40;60

На основі отриманої експериментально сумарної помилки системи Δ визначити її складові за збуренням Δ_f та за завданням Δ_g . Побудувати графічно наступні залежності: $\Delta_f = f(I_a)$ при 3-х значеннях коефіцієнта передачі розімкнутої системи K_Σ ; $\Delta_g = f(v)$ при 3-х значеннях K_Σ ; $\Delta_f = f(K_\Sigma)$ при одному значенні I_a ; $\Delta_g = f(K_\Sigma)$ при одному значенні v .

Визначити експериментальні значення статизму системи δ та добротності за швидкістю K_v і порівняти їх з розрахунковими значеннями. Побудувати суміщені криві завдання $g(t)$ та положення двигуна $\varphi(t)$ для у поточному досліді.

2.3.5 Дослідити властивості САР із статичним регулятором положення при відпрацюванні квадратичного завдання $g = at^2/2$. Значення прискорення a та коефіцієнта K_{reg} слід взяти з табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення a та K_{reg} для виконання п. 2.3.5

Варіант	1	2	3	4	5	6
a , рад/с ²	0.8	0.75	0.9	0.85	0.65	0.7
K_{reg} , о.к./рад	20;50	25;55	30;60	25;60	20;40	30;50

Побудувати графік $\Delta = f(t)$ для всієї траєкторії руху двигуна у поточному досліді. Опрацювати цей графік шляхом нанесення на його ділянки відповідних довідкових даних про I_a та K_Σ і зробити висновок про вплив збурення та коефіцієнта передачі розімкнутої системи на її помилку.

2.3.6 Дослідити властивості САР з астатичним регулятором положення двигуна при відпрацюванні завдання $g = const$ за різних значень збурення $f = const$. Значення завдання положення g та коефіцієнта регулятора K_{reg} взяти з табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Значення g та K_{reg} для виконання п. 2.3.6

Варіант	1	2	3	4	5	6
g , рад	15	25	20	23	17	22
K_{reg} , о.к./рад	190;210	195;220	200;230	180;200	190;220	200;240

Побудувати графік $\Delta = f(t)$ для всієї траєкторії руху двигуна у поточному досліді. Проаналізувати цей графік щодо впливу збурення та коефіцієнта передачі регулятора на помилку системи.

2.3.7 Дослідити властивості САР з астатичним регулятором положення двигуна при відпрацюванні лінійного завдання $g=vt$. Значення швидкості V та коефіцієнта передачі регулятора K_{reg} взяти з табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення V та K_{reg} для виконання п. 2.3.7

Варіант	1	2	3	4	5	6
v , рад/с	2.2	2.5	2.3	2.4	2.7	2.6
K_{reg} , о.к./рад	190;210	195;220	200;230	180;200	190;220	200;240

Побудувати графік $\Delta = f(t)$ для всієї траєкторії руху двигуна у поточному досліді, опрацювати цей графік шляхом нанесення на його ділянки довідкових даних про I_a та K_{Σ} . За результатами досліджень переконатися, що $\Delta = 0$; $\Delta \neq f(K_{\Sigma})$; $\Delta \neq f(I_a)$. Визначити експериментально добротність системи за швидкістю K_v і порівняти її з розрахунковим значенням.

2.3.8 Зробити висновки за проведеними дослідженнями та підготувати звіт.

2.4 Методичні вказівки до виконання роботи

2.4.1 Використовуючи лекційні матеріали, рекомендовану літературу та дані методичні вказівки вивчити особливості усталених режимів роботи статичних та астатичних САР.

2.4.2 Запуск ЛУ в робочий стан здійснюється після дозволу викладача. Він полягає у з'єднанні комп'ютера та контролера кабелем USB, встановленні тумблерів S1 та S2 блока вибору режиму роботи у нейтральне положення, вмиканні автоматичного вимикача SF та кнопкового перемикача SB1, після чого має засвітитися світлодіод HL1. Далі слід запустити у комп'ютері Matlab, запустити на виконання m-file з іменем lab2_TAK, запустити у Simulink робочу програму ЛУ з іменем lab2_TAK_s та ініціювати перехід до роботи в реальному часі шляхом послідовно-

го натискання на панелі інструментів вікна програми кнопки TOOLS і далі в меню: RUN on TARGET HARDWARE - RUN. Після закінчення компіляції робоча програма запрацює в режимі реального часу, ознакою чого є поява чисел в дисплейних елементах вікна програми.

2.4.3 Після кожного запуску у Simulink робочої програми ЛУ треба виконати *початкове позиціювання САР*. Для цього у блок-схемі програми треба відкрити блок Б5, де слід переписати покази дисплея f_{i_real} в елемент f_{i_0} та перемкнути перемикач S3 у верхнє положення. Потім тумблер S1 установки перемкнути в положення «автомат». Після цих дій ЛУ досягне стану готовності до виконання дослідів.

2.4.4 Безпосереднє виконання дослідів вимагає виконання наступних дій: а) в блоці Б2 програми за допомогою перемикача S2 вибрати тип регулятора (статичний чи астатичний) та задати потрібний коефіцієнт передачі регулятора K_{reg} ; б) здійснити замикання САР шляхом перемикачання «вниз» перемикача S1 у блок-схемі програми; в) на вході блоку Б1 задати потрібне значення параметра сигналу задання.

2.4.5 Для зупинки робочої програми ЛУ треба натиснути кнопку Stop на панелі інструментів вікна програми. Після цього у блок-схемі програми треба перемкнути перемикач S1 «вгору», в блоці Б5 перемкнути перемикач S3 «вниз» і обнулити завдання на входах блоку Б1. Далі тумблер S1 установки перемкнути в «нейтральне».

2.4.6 Для виконання п. 2.3.3 щодо визначення коефіцієнта передачі об'єкта керування K_0 слід провести досліди усталеного руху двигуна без навантаження на швидкостях $v=3$ рад/с та $v=8$ рад/с (v задається на вході Б1) у замкнутій САР зі статичним регулятором (регулятор вибирається у блоці Б2 перемикачем S2, а замикання САР здійснюється перемикачем S1) та зафіксувати відповідні значення u_1 та u_2 сигналу керування на виході регулятора. При цьому $K_0 = \Delta\omega / \Delta u$, де $\Delta\omega = 8 - 3 = 5$, $\Delta u = u_2 - u_1$.

2.4.7 Для виконання п. 2.3.4 щодо дослідження властивостей САР зі статичним регулятором положення при відпрацюванні лінійного завдання $g=vt$, значення величин v та K_{reg} слід взяти з табл. 2.1. Всі досліди треба провести для 3-х зна-

чень ваги вантажу – 0.1 кг; 0.3 кг; 0.5 кг. Сумарну помилку системи Δ у кожному досліді занести в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Значення сумарної помилки Δ за результатами виконання п. 2.3.4

$K_{\text{reg}}, \frac{\text{о.к.}}{\text{рад}}$									
$I_a, \text{А}$									
$v, \text{рад/с}$									

За занесеною в табл. 2.5 сумарною помилкою системи Δ її складові за збуренням Δ_f та за завданням Δ_g можна визначити як

$$\Delta_f = \Delta - \Delta_g^*; \quad \Delta_g = \Delta - \Delta_f^*,$$

де, на основі (2.12) та (2.14) розрахункові значення компонент помилки обчислюються за формулами $\Delta_f^* = K_{f0} K_{\Sigma}^{-1} I_a$; $\Delta_g^* = K_{\Sigma}^{-1} v$, де, у свою чергу, $K_{\Sigma} = K_{\text{reg}} K_0$; $K_0 = K_u c_m^{-1} i_r^{-1}$; $K_{f0} = R_a c_m^{-1} i_r^{-1}$. При визначенні K_{Σ} треба використати експериментальне значення K_0 .

Експериментальні значення величин δ та K_v слід визначити за даними табл. 2.5. Розрахункові значення δ та K_v обчислюються за методом коефіцієнтів помилок (див. п. 2.1.3, 2.1.4) для номінальних параметрів досліджуваної САР. Для побудови суміщених кривих $g(t)$ та $\phi(t)$ траєкторії руху двигуна слід скопіювати з Workspace масиви змінних fi_ref , fi , $time$ на флеш-пам'ять.

2.4.8 Для виконання п. 2.3.5 щодо дослідження властивостей САР зі статичним регулятором положення при відпрацюванні квадратичного завдання $g = at^2/2$ значення прискорення a та коефіцієнта K_{reg} слід взяти з табл. 2.2. Всі досліді треба провести для 2-х значень ваги вантажу – 0.1 кг і 0.4 кг. Для побудови графіка $\Delta = f(t)$ та його наступного опрацювання слід скопіювати з Workspace масиви змінних $error$, I_a , $time$ на флеш-пам'ять.

2.4.9 Для виконання п. 2.3.6 щодо дослідження властивостей САР з астатичним регулятором положення при відпрацюванні завдання $g=\text{const}$ в умовах $f=\text{var}$ значення величин g та K_{reg} слід взяти з табл. 2.3. Всі досліди треба провести для 3-х значень ваги вантажу – 0.1 кг, 0.3 кг, 0.5 кг. Для побудови графіка $\Delta = f(t)$ слід скопіювати з Workspace масиви змінних *error*, *time* на флеш-пам'ять.

2.4.10 Для виконання п. 2.3.7 щодо дослідження властивостей САР з астатичним регулятором положення при відпрацюванні лінійного завдання $g=vt$ значення величин v та K_{reg} слід взяти з табл. 2.4. Всі досліди треба провести для 2-х значень ваги вантажу – 0.1 кг і 0.4 кг. Для побудови графіка $\Delta = f(t)$ та його наступного опрацювання слід скопіювати з Workspace масиви змінних *error*, *Ia*, *time* на флеш-пам'ять. Для визначення експериментального значення добротності за швидкістю K_v слід використати отриману залежність $\Delta = f(t)$. Розрахункове значення K_v обчислюється за методом коефіцієнтів помилок (див. п. 2.1.3, 2.1.4) для номінальних параметрів досліджуваної САР.

2.4.11 Зберегти на портативному інформаційному носії всі отримані при виконанні лабораторної роботи результати для їх використання під час підготовки та захисту звіту з роботи.

2.5 Зміст звіту

2.5.1 Мета роботи.

2.5.2 Узагальнена структура досліджуваних САР, номінальні значення параметрів об'єкта керування.

2.5.3 Передатні функції за помилкою та за збуренням для САР з двома типами регуляторів.

2.5.4 Програма досліджень.

2.5.5 Вирази для перших трьох коефіцієнтів помилок за завданням та за збуренням в САР положення двигуна зі статичним та астатичним регуляторами.

2.5.6 Розрахунок величин K_0 , δ , K_v та порівняння їх обчислених і експериментальних значень.

2.5.7 Графічні залежності за результатами виконання п. 2.3.4-2.3.7.

2.5.8 Висновки з роботи.

2.6 Контрольні запитання

2.6.1 Дайте визначення статичному режиму роботи системи.

2.6.2 Що таке статична помилка та статизм системи?

2.6.3 Назвіть типові закони зміни зовнішніх дій у САР.

2.6.4 Що таке усталений динамічний режим роботи САР?

2.6.5 Запишіть математично типові закони змін зовнішніх дій у САР

2.6.6 Поясніть призначення та суть методу коефіцієнтів помилок.

2.6.7 Як називаються перші чотири коефіцієнти помилок САР?

2.6.8 Назвіть основні шляхи підвищення точності САР.

2.6.9 Як впливає замикання системи на її статичну помилку?

2.6.10 Де у структурній схемі САР слід вводити інтегрувальну ланку, щоб ліквідувати статичну помилку системи від дії збурення?

2.6.11 Запишіть передатну функцію ізодромної інтегрувальної ланки.

2.6.12 Запишіть передатну функцію замкнутої системи стеження за помилкою на основі передатної функції розімкнутої системи.

2.6.13 Яким є фізичний сенс поняття "добротність системи за швидкістю"?

2.6.14 У чому фізичний сенс поняття "добротність САР за прискоренням".

2.6.15 Як визначити за методом коефіцієнтів помилок добротність системи за швидкістю та за прискоренням?

2.6.16 Як визначити за методом коефіцієнтів помилок статизм системи?

2.6.17 Якщо САР має астатизм 3-го порядку щодо деякої зовнішньої дії, то чому дорівнюють добротності системи за швидкістю та за прискоренням щодо цієї дії?

2.6.18 Який порядок астатизму має бути в системі, щоб її помилка за ривком дорівнювала нулю?

2.6.19 Обчисліть швидкісну помилку системи стеження при лінійно-змінюваному завданні $g = 5t$ (рад), якщо її добротність за швидкістю $K_v = 25 \text{ c}^{-1}$?

2.6.20 Обчисліть добротність за швидкістю системи стеження, яка має добротність за прискоренням $K_a = 10 \text{ c}^{-2}$.

2.6.21 Якими були порядки астатизму за завданням та за збуренням в досліджуваній САР зі статичним регулятором?

2.6.22 Якими були порядки астатизму за завданням та за збуренням в досліджуваній САР з астатичним регулятором?

Література

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., – СПб, Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5-ти тт. Т.1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред.. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 656 с.
4. Теорія автоматичного керування : Частина II : Курс лекцій / Уклад. М.Г. Попович, Б.І. Приймак. – К.: НТУУ "КПІ", 2012. – 165 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/2209>.
5. Control System Toolbox. User's Guide, The MathWorks, Release 2009b, 2009.

Лабораторна робота №3

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА ЯКОСТІ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета роботи – методом математичного моделювання на комп'ютері дослідити задану систему автоматичного керування на стійкість та визначити вплив коефіцієнта передачі розімкнутої системи на показники якості керування.

Тривалість лабораторної роботи – 4 год.

Тривалість самостійної роботи – 4 год.

3.1 Основні теоретичні відомості

Стійкість є однією з необхідних умов працездатності систем автоматичного керування (САК). Лінійна система стійка, якщо її реакція на будь-яку обмежену дію також обмежена. У стійкій системі вільна складова перехідного процесу, викликаного якою-небудь дією, з часом затухає і система повертається в усталений стан.

Загальною умовою затухання вільної складової перехідного процесу є від'ємність дійсних частин усіх коренів характеристичного рівняння системи, отже, дослідження стійкості можливе шляхом розв'язання характеристичного рівняння і встановлення знаку дійсної частини кожного кореня. Однак, при степені рівняння вище другого, розв'язання, і особливо аналіз впливу різних параметрів на динаміку системи, зручніше робити за допомогою непрямих методів – критеріїв стійкості. Розрізняють алгебричні критерії Рауса, Гурвіца, частотні критерії Найквіста, Михайлова, метод D-розбиття (метод побудови зон стійкості на площині параметрів) і ряд інших.

У даній роботі досліджується стійкість лінійної системи 3-го порядку. Найпростіше досліджувати стійкість такої системи за критерієм Гурвіца.

Якщо характеристичне рівняння системи 3-го порядку записати у вигляді

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0, \quad (3.1)$$

де a_0, a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти, зумовлені параметрами ланок САК, то умови стійкості за критерієм Гурвіца зводяться до вимоги додатності всіх коефіцієнтів і виконанню нерівності

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0. \quad (3.2)$$

Структурна схема досліджуваної системи наведена на рис. 3.1.

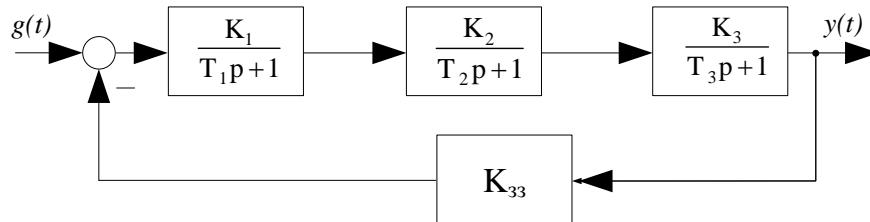


Рисунок 3.1 – Структурна схема досліджуваної системи

Передатна функція замкнутої системи за завданням має вигляд

$$W_3(p) = \frac{K_1 K_2 K_3}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) + K_1 K_2 K_3 K_{33}}, \quad (3.3)$$

отже, характеристичне рівняння САК можна записати у вигляді

$$T_1 T_2 T_3 p^3 + (T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_3 T_1) p^2 + (T_1 + T_2 + T_3) p + K_1 K_2 K_3 K_{33} + 1 = 0,$$

де $K_1 K_2 K_3 K_{33} = K$ – коефіцієнт передачі розімкнутої системи.

При додатних сталих часу і коефіцієнтах передачі, умова стійкості системи зводиться до наступної нерівності:

$$(T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_3 T_1)(T_1 + T_2 + T_3) - T_1 T_2 T_3 (1 + K) > 0$$

або

$$K < (T_1 + T_2 + T_3) \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} \right) - 1. \quad (3.4)$$

Остання нерівність показує, що стійкість системи зрештою порушиться, якщо необмежено збільшувати коефіцієнт K при будь-яких значеннях сталих часу. Граничне за стійкістю значення коефіцієнта передачі розімкнutoї системи називається критичним і може бути визначене за формулою:

$$K_{KP} = (T_1 + T_2 + T_3) \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} \right) - 1. \quad (3.5)$$

Стійкість САК є необхідною, але далеко не достатньою умовою практичної придатності системи. Істотною є ще якість системи керування, яка оцінюється точністю САК в усталених режимах та якістю перехідних процесів в системі.

Якість перехідних процесів обумовлена наступними основними показниками:

1. Характер перехідного процесу – монотонний (зокрема аперіодичний), аперіодичний з перерегулюванням, коливальний.

2. Тривалість перехідного процесу чи час регулювання t_p – практично визначається інтервалом часу від початку перехідного процесу до моменту, коли відхилення вихідної величини від її нового усталеного значення $y_{уст}$ стає меншим ніж деяка величина ε , яку часто приймають рівною 5% від $y_{уст}$ (теоретично тривалість перехідного процесу $t_p = \infty$).

3. Перерегулювання σ – максимальне відхилення керованої величини від усталеного значення, виражене у відсотках:

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100\% = \frac{\Delta y_{\max 1}}{y_{уст}} \cdot 100\% .$$

4. Ступінь затухання перехідного процесу ψ , який визначається за формулою

$$\psi = \left(1 - \frac{\Delta y_{\max 2}}{\Delta y_{\max 1}} \right) \cdot 100\% ,$$

де $\Delta y_{\max 1}$ і $\Delta y_{\max 2}$ – величини, вказані на рис. 3.2. Ступінь згасання ψ характеризує коливальні властивості САК.

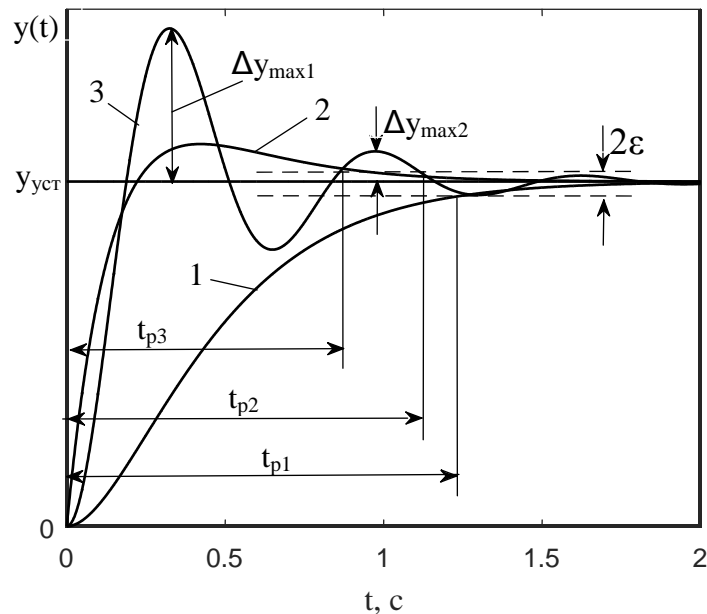


Рисунок 3.2 – Перехідні процеси та показники якості

Крім розглянутих вище основних показників перехідних процесів на практиці використовуються також додаткові показники якості. Сюди відносяться наступні показники.

1. Час запізнення t_z , що дорівнює інтервалу часу від початку перехідного процесу до моменту, коли $y(t)$ вперше сягне $0.5y_{уст}$.
2. Час наростання t_n , що дорівнює інтервалу часу від початку перехідного процесу до моменту, коли $y(t)$ вперше сягне $y_{уст}$.
3. Час першого максимуму t_m , що дорівнює інтервалу часу від початку перехідного процесу до моменту, коли $y(t)$ сягне свого максимуму.
4. Частота коливань $\omega_k = 2\pi/T_k$, де період коливань T_k дорівнює інтервалу часу між сусідніми максимумами або мінімумами кривої $y(t)$.

Додаткові показники якості демонструються на рис. 3.3.

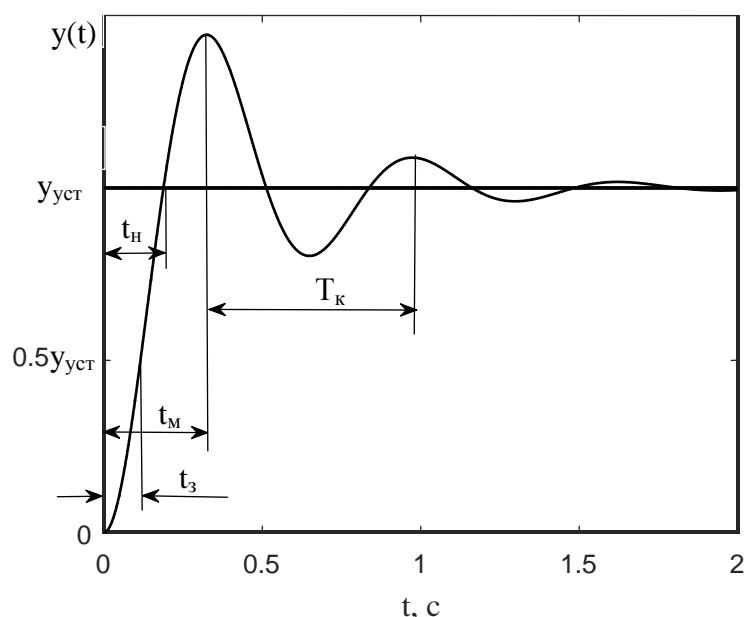


Рисунок 3.3 – Додаткові показники якості перехідних процесів

Якщо в досліджуваній системі, що складається з трьох аперіодичних ланок, установити досить малий коефіцієнт зворотного зв'язку $K_{зз}$, перехідна характеристика системи буде не коливальною і плавною (характеристика 1 на рис. 3.2). При збільшенні коефіцієнта зворотного зв'язку перехідні характеристики на рис. 3.2 спочатку приймуть вид характеристик 2, а потім – характеристик 3, отже буде збільшуватися швидкодія системи (буде зменшуватися час регулювання t_p), але водночас буде зменшуватися ступінь затухання і з'являться коливання.

При подальшому збільшенні коефіцієнта зворотного зв'язку, а отже, і коефіцієнта передачі розімкнутої системи аж до його критичного за стійкістю значення $K_{кр}$, що відповідає межі стійкості, ступінь затухання ψ прямуватиме до 0%. Унаслідок цього час регулювання, що спочатку зменшувався, почне знову наростати до нескінченності, тобто якість перехідного процесу погіршується.

Збільшення коефіцієнта передачі розімкнутої системи вище його критичного за стійкістю значення $K_{кр}$, призводить до втрати стійкості системи і

перехідний процес у цьому випадку буде розходитися (вільна складова переходного процесу буде нескінченно зростати).

3.2 Програма роботи

3.2.1. Перевірити стійкість системи за критерієм Гурвіца. Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення параметрів САР для різних варіантів роботи

Варіант	K1	K2	K3	K _{зз}	T1, с	T2, с	T3, с
1	10	2	15	0,05	0,02	0,3	0,5
2	10	2	20	0,1	0,01	0,2	0,4
3	20	2	5	0,1	0,2	0,04	0,02
4	10	10	5	0,05	0,4	0,05	0,025
5	30	2	10	0,05	0,1	0,02	0,005
6	8	2	16	0,05	0,02	0,25	0,5

3.2.2. Обчислити критичне значення коефіцієнта передачі розімкнутої системи $K_{кр}$.

3.2.3. Створити схему моделі досліджуваної системи згідно з рис. 3.4.

3.2.4. Промодельовати перехідний процес при заданих у табл. 3.1 параметрах ланок.

3.2.5. Промодельовати перехідний процес в системі при критичному коефіцієнті передачі розімкнутої системи $K_{кр}$.

3.2.6. Промодельовати перехідні процеси при шести різних значеннях коефіцієнта передачі розімкнутої системи K у межах $0 < K < K_{кр}$. Мінімальне значення K вибрати таким, при якому перехідна характеристика буде аперіодичною (характеристика 1 на рис. 3.2).

3.2.7. За отриманими перехідними характеристиками визначити показники якості і побудувати графіки залежностей $t_p = f(K)$; $\sigma = f(K)$; $\psi = f(K)$.

3.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна робота виконується на персональному комп'ютері. Дослідження системи проводиться в програмному комплексі Matlab з використанням системи візуального моделювання Simulink.

3.4 Методичні вказівки

3.4.1. Запуск програмного комплексу Matlab виконується через меню Пуск | Програми чи за допомогою ярлика на робочому столі. У результаті відкривається командне вікно: Matlab Command Window.

Для створення моделі досліджуваної системи необхідно в меню File командного вікна Matlab вибрати команду New | Model, у результаті на екрані з'являється вікно бібліотек блоків Simulink Library Browser і порожнє вікно нової моделі з ім'ям untitled.

Альтернативним способом виклику вікна створення нової моделі є натискання кнопки Simulink Library Browser, розташованої на панелі інструментів командного вікна Matlab. У результаті на екрані з'явиться вікно бібліотек блоків Simulink Library Browser, на панелі інструментів якого треба натиснути кнопку Create a new model.

Перетягуючи мишкою відповідні блоки з бібліотеки блоків Simulink Library Browser у вікно нової моделі з ім'ям untitled, побудувати схему моделі досліджуваної системи, наведену на рис.3.4.

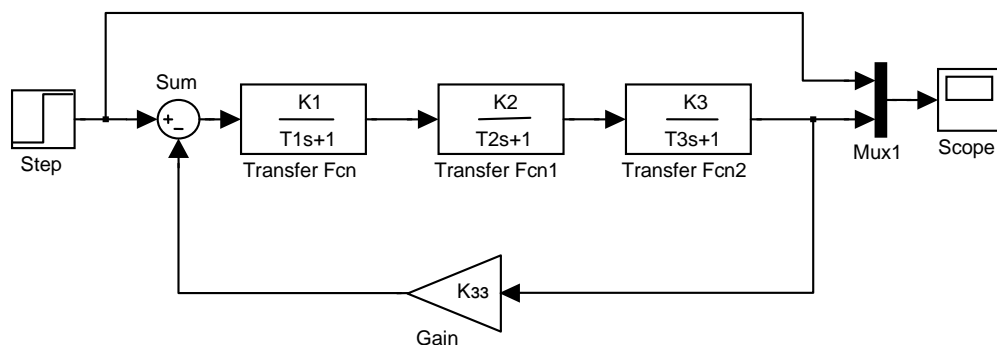


Рисунок 3.4 – Схема моделі досліджуваної САК

Блоки, з яких складається модель, необхідно взяти з таких бібліотек:

Блок стрибкоподібного сигналу Step з бібліотеки Sources;

Блок сумматора Sum та пропорційної ланки Gain з бібліотеки Math;

Блок передатної функції Transfer Fcn з бібліотеки Continuous;

Блок мультиплексора Mux з бібліотеки Signals & Systems;

Блок осцилографа Scope з бібліотеки відображення сигналів Sinks.

Після створення схеми моделі треба установити необхідні параметри блоків моделі відповідно до параметрів передатних функцій ланок системи, наведених в табл. 3.1, для заданого викладачем варіанта завдання.

Час початку моделювання встановлюють рівним нулю, а час закінчення процесу моделювання приймають рівним значенню в п'ять разів більшому від максимальної сталої часу в модельованій системі.

3.4.2. Для подальшої обробки і використання отриманих графіків зручно вивести результати моделювання з Simulink у робочий простір Matlab. Вікно відображення графіків у Matlab дозволяє копіювати їх (меню Edit | Copy Figure) в інший документ чи зберігати окремо у файлі.

3.4.3. Зміну коефіцієнта передачі розімкнутої системи K можна здійснювати, змінюючи коефіцієнт зворотного зв'язку K_{zz} (рис.3.1) чи коефіцієнт передачі будь якої із трьох послідовно з'єднаних ланок у контурі регулювання, тому що $K=K1 \cdot K2 \cdot K3 \cdot K_{zz}$. Однак, при зміні коефіцієнта зворотного зв'язку K_{zz} , істотно змінюється усталене значення вихідної величини, що утрудняє порівняння отриманих графіків перехідних характеристик. Тому зміну коефіцієнта передачі розімкнутої системи K доцільно робити, змінюючи коефіцієнт передачі однієї з трьох послідовно ввімкнених ланок у прямому каналі контуру регулювання.

3.5 Зміст звіту

3.5.1. Розрахунок стійкості системи за критерієм Гурвіца.

3.5.2. Розрахунок критичного значення коефіцієнта передачі розімкнутої системи $K_{кр}$.

3.5.3. Схема моделі досліджуваної САК.

3.5.4. Отримані в результаті моделювання перехідні характеристики при різних коефіцієнтах передачі розімкнутої системи.

3.5.5. Показники якості (час регулювання, перерегулювання і ступінь затухання) при різних коефіцієнтах передачі розімкнутої системи.

3.5.6. Графіки залежностей $t_p = f(K)$; $\sigma = f(K)$; $\psi = f(K)$.

3.5.7. Аналіз впливу коефіцієнта передачі розімкнутої системи K на якість перехідного процесу.

3.5.8. Висновки з роботи.

3.6 Контрольні питання

3.6.1. Що таке стійкість системи?

3.6.2. Як визначити стійкість системи за коренями характеристичного рівняння?

3.6.3. Сформулюйте критерій стійкості Гурвіца.

3.6.4. У чому полягає основне протиріччя динаміки і статички САР?

3.6.5. Що розуміють під критичним значенням коефіцієнта передачі розімкнутої САР?

3.6.6. Як поділяються перехідні процеси за характером?

3.6.7. Назвіть основні показники якості перехідного процесу і дайте їх визначення.

3.6.8. Як впливає коефіцієнт K на показники якості перехідного процесу в системі?

3.6.9. Які перехідні процеси називаються коливальними?

3.6.10. Як складається головний визначник Гурвіца?

3.6.11. Як пов'язаний характер перехідного процесу з коренями характеристичного рівняння системи?

3.6.12. Назвіть кореневі показники якості САР.

3.6.13. Які перехідні процеси називаються монотонними?

3.6.14. Як визначити ступінь стійкості системи за коренями її характеристичного рівняння?

3.6.15. Як визначити ступінь коливальності системи за коренями її характеристичного рівняння?

3.6.16. Які перехідні процеси називаються аперіодичними?

3.6.17. Як оцінити тривалість перехідного процесу за коренями характеристичного рівняння системи?

3.6.18. Якими мають бути корені характеристичного рівняння системи щоб у ній існували незатухаючі коливання?

3.6.19. Як визначити сталу часу аперіодичного перехідного процесу?

3.6.20. Як залежить спричинена збуренням статична помилка статичної САР від коефіцієнта передачі розімкнутої системи K ?

Література

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.

2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., – СПб, Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.

3. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / В.А. Бесекерский [и др.]. – М. : Наука, 1978. – 512 с.

4. Теорія автоматичного керування : Частина II : Курс лекцій / Уклад. М.Г. Попович, Б.І. Приймак. – К.: НТУУ "КПІ", 2012. – 165 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/2209>.

5. Control System Toolbox. User's Guide, The MathWorks, Release 2009b, 2009.

Лабораторна робота №4

СИНТЕЗ ПОСЛІДОВНИХ КОРИГУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета роботи – вивчення методу синтезу послідовних коригувальних пристроїв за допомогою логарифмічних амплітудно-частотних характеристик і дослідження впливу коригувального пристрою на показники якості синтезованої системи автоматичного керування.

Тривалість лабораторної роботи – 4 год.

Тривалість самостійної роботи – 4 год.

4.1 Основні теоретичні відомості

4.1.1 Методика синтезу послідовних коригувальних пристроїв методом ЛАХ

Одним з найбільш ефективних інженерних методів синтезу систем автоматичного керування (САК), що відповідали б заданим вимогам до їх якості, є метод логарифмічних амплітудно-частотних характеристик (ЛАХ).

Ідея методу ґрунтується на тому, що для стійких мінімально-фазових систем існує однозначний зв'язок між перехідною характеристикою замкнутої системи і виглядом ЛАХ розімкнутої системи. Знаючи бажаний вигляд перехідного процесу, можна побудувати відповідну такому процесу ЛАХ. Далі, знаючи вигляд бажаної ЛАХ та ЛАХ вихідної системи (об'єкта керування), визначають ЛАХ коригувального пристрою (регулятора).

Бажана ЛАХ розімкнутої системи будується в залежності від необхідних показників якості САК: 1) точності в усталеному режимі – статичної помилки Δ або статизму δ , що є відношенням помилки до збурення; 2) часу регулювання t_p ; 3) перерегулювання σ . Вона може бути розділена на три ділянки: низькочастотну, середньочастотну і високочастотну.

Низькочастотна ділянка ЛАХ визначає точність системи у статичному та в усталених динамічних режимах роботи. В астатичній щодо збурення системі з астатизмом 1-го порядку буде забезпечуватися нульова статична помилка, а низькочастотна ділянка ЛАХ матиме нахил -20дБ/дек . У статичній системі низькочастотна ділянка ЛАХ буде горизонтальною, а статична помилка Δ від дії на об'єкт керування збурення $f(t) = \text{const}$ за відсутності у контурі інтегровальних ланок дорівнюватиме

$$\Delta = \frac{fK_f}{1 + K_\Sigma}, \quad (4.1)$$

де K_Σ – сумарний коефіцієнт передачі розімкненої системи; K_f – коефіцієнт передачі об'єкта за збуренням. При цьому статизм системи δ визначатиметься як

$$\delta = \frac{\Delta}{f} = \frac{K_f}{1 + K_\Sigma}. \quad (4.2)$$

Середньочастотна частина ЛАХ найбільш істотна, оскільки вона головним чином визначає запас стійкості і якість перехідних процесів у системі. В інтервалі середніх частот знаходиться частота зрізу системи ω_z , що пов'язана з часом регулювання t_p наступною залежністю

$$\omega_z = \frac{K_\sigma \pi}{t_p}, \quad (4.3)$$

де: K_σ – коефіцієнт, що визначається у функції від припустимої величини перерегулювання за графіками, наведеними в [1]. При $\sigma = 15\text{-}35\%$, $K_\sigma = 1.3\text{-}3.4$, причому, чим більше σ , тим більший K_σ .

Для забезпечення достатнього демпфування скоригованої САК нахил бажаної ЛАХ у зоні частоти зрізу (зліва від ω_z до ω' і справа – до ω'') повинен складати -20 дБ/дек . Чим довша ділянка ЛАХ із зазначеним нахилом, тим менша коливальність перехідного процесу. Зазвичай довжина ділянки ЛАХ з нахилом -20 дБ/дек по обидва боки від частоти зрізу

вибирається не меншою ніж 1-2 октави (одна октава відповідає відношенню частот, рівному 2). Тобто $\omega' \leq (0.25 \div 0.5) \omega_s$, а $\omega'' \geq (2 \div 4) \omega_s$.

Лінію з'єднання середньочастотної ділянки бажаної ЛАХ з низькочастотною ділянкою бажаної ЛАХ (лінія в області частот зліва від ω') доцільно проводити паралельно до ЛАХ вихідної (нескоригованої) САК, що дозволить отримати простіший коригувальний пристрій.

Високочастотна ділянка бажаної ЛАХ, тобто частина ЛАХ в області частот справа від ω'' , порівняно мало впливає на якість перехідного процесу. Вона визначає фільтрувальні властивості замкненої системи, які тим кращі чим швидше спадає ЛАХ. Однак, для спрощення коригувального пристрою доцільно високочастотну ділянку бажаної ЛАХ проводити паралельно до ЛАХ вихідної САК.

Послідовний коригувальний пристрій з передатною функцією $W_k(p)$ включається в прямий канал системи (рис. 4.1). Для зменшення габаритів та енергоспоживання коригувальний пристрій повинен розташовуватися по можливості ближче до входу системи (зазвичай на виході суматора), де сигнали мають найнижчий рівень потужності.

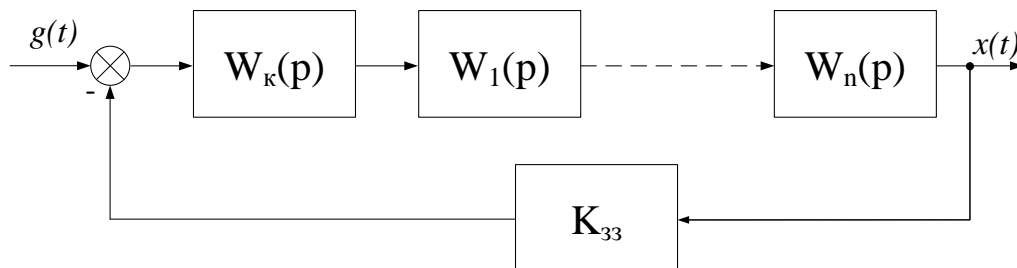


Рисунок 4.1 – Структура САК з послідовним коригувальним пристроєм

Передатна функція вихідної розімкнутої системи $W_e(p)$ дорівнює

$$W_e(p) = W_1(p)W_2(p) \dots W_n(p)K_{33}. \quad (4.4)$$

Після введення у контур послідовного коригувального пристрою отримаємо бажану передатну функцію $W_e(p)$ у вигляді

$$W_{\bar{o}}(p) = W_{\kappa}(p)W_1(p)W_2(p)\dots W_n(p)K_{33} = W_{\kappa}(p)W_{\bar{e}}(p). \quad (4.5)$$

Переходячи до ЛАХ, одержимо

$$L_{\bar{o}}(\omega) = L_{\kappa}(\omega) + L_{\bar{e}}(\omega),$$

звідкіля

$$L_{\kappa}(\omega) = L_{\bar{o}}(\omega) - L_{\bar{e}}(\omega). \quad (4.6)$$

З останнього виразу впливає наступний порядок синтезу послідовного коригувального пристрою:

1) виходячи із заданої структури системи і параметрів ланок, будується ЛАХ вихідної розімкнутої системи $L_{\bar{e}}(\omega)$.

2) за заданими показниками якості керування будується бажана ЛАХ скоригованої системи $L_{\bar{o}}(\omega)$.

3) віднімаючи від ЛАХ скоригованої системи $L_{\bar{o}}(\omega)$ ЛАХ вихідної системи $L_{\bar{e}}(\omega)$, визначається ЛАХ коригувального пристрою $L_{\kappa}(\omega)$;

4) за знайденою ЛАХ коригувального пристрою записується його передатна функція $W_{\kappa}(p)$.

4.1.2 Синтез коригувального пристрою для статичної САК

Як приклад, розглянемо задачу синтезу статичної САК, структурна схема якої наведена на рис. 4.2. Вихідна система включає три аперіодичних ланки та ланку зворотного зв'язку з коефіцієнтом K_{33} .

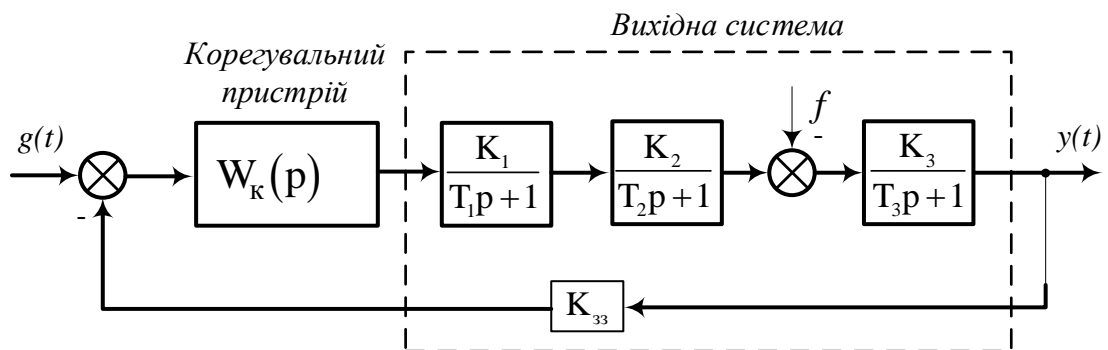


Рисунок 4.2 – Структурна схема системи, що синтезується

Для вихідної системи є заданими значення коефіцієнтів передачі ланок K_1, K_2, K_3, K_{33} та сталих часу T_1, T_2, T_3 . Коефіцієнт передачі вихідної розімкненої системи дорівнює $K_B = K_1 K_2 K_3 K_{33}$.

До САК, що синтезується, задані вимоги: 1) статизм системи $\delta > 0$ за постійного збурення $f = const$; 2) показники якості перехідного процесу – перерегулювання σ та час регулювання t_p .

Розв'язання задачі синтезу. На 1-му етапі слід визначити сумарний коефіцієнт передачі розімкненої системи та коефіцієнт передачі коригувального пристрою, що забезпечать необхідну статичну точність.

З формули (4.2) бачимо, що необхідний коефіцієнт передачі розімкненої системи визначається як $K_\Sigma = K_f \delta^{-1} - 1$, де $K_f = K_3$ згідно з рис.4.2. Задавши деякий запас точності, прийmemo $K_\Sigma \approx K_f / \delta$. Отже низькочастотна горизонтальна ділянка $L_\sigma(\omega)$ проходить на висоті $20 \lg K_\Sigma$ (дБ). Ордината низькочастотної горизонтальної ділянки $L_\kappa(\omega)$ дорівнюватиме $q = 20 \lg K_\kappa = 20 \lg K_\Sigma - 20 \lg K_B$ (дБ). Звідси коефіцієнт передачі коригувального пристрою визначиться як $K_\kappa = 10^{q/20}$.

На 2-му етапі треба визначити частоту зрізу бажаної ЛАХ та допустимі частоти, що обмежують середньочастотну ділянку зліва і справа. За формулою (4.3), попередньо вибравши K_σ у залежності від допустимої величини перерегулювання σ , отримаємо частоту зрізу ω_z , а допустимі частоти спряження асимптот зліва і справа від частоти зрізу дорівнюватимуть відповідно $\omega' = \omega_z / 2$ та $\omega'' = 2\omega_z$.

На 3-му етапі здійснюється побудова ЛАХ та визначається $W_\kappa(p)$. Отже за отриманими даними та вихідними параметрами системи будемо асимптотичні вихідну $L_\sigma(\omega)$ та бажану $L_\sigma(\omega)$ ЛАХ, і за (4.6) шляхом геометричного віднімання знаходимо ЛАХ коригувальної ланки $L_\kappa(\omega)$. Результати графічних побудов представлені на рис. 4.3.

За виглядом $L_k(\omega)$ записуємо передатну функцію коригувального пристрою

$$W_k(p) = \frac{K_k(\tau_1 p + 1)}{(\tau_2 p + 1)}, \quad (4.7)$$

де $\tau_2 = T_3$.

На 4-му етапі треба визначити запаси стійкості для скоригованої системи. Для цього запишемо вираз для ЛФХ бажаної системи

$$\varphi_6(\omega) = \arctg(\tau_1 \omega) - \arctg(\tau_2 \omega) - \arctg(T_1 \omega) - \arctg(T_2 \omega) - \arctg(T_3 \omega). \quad (4.8)$$

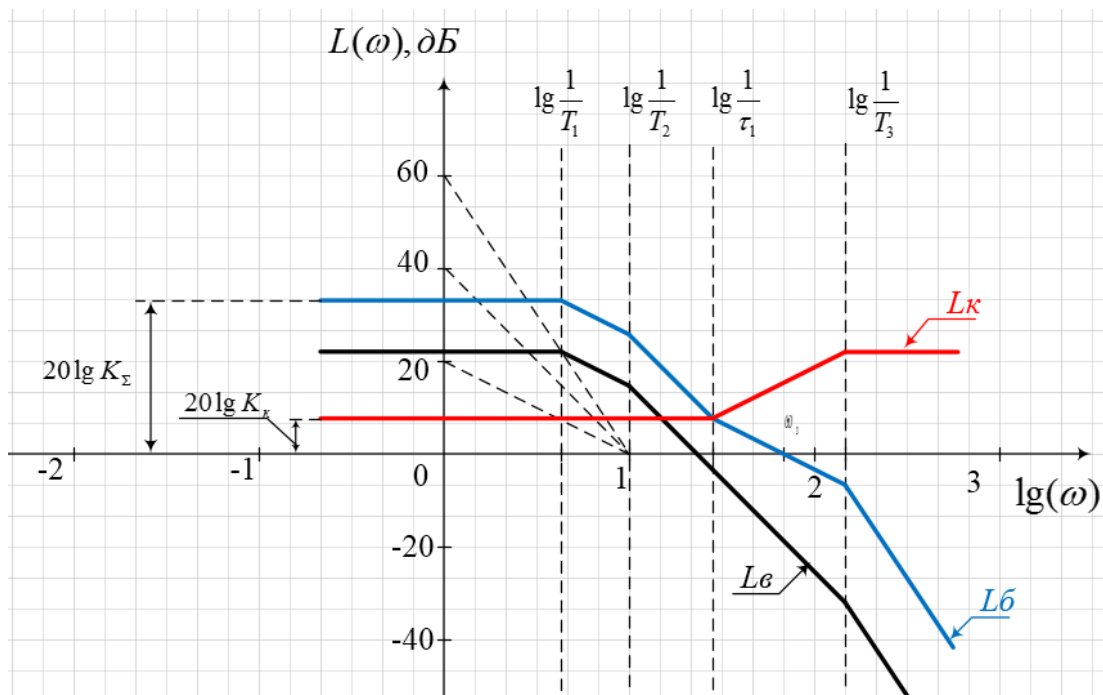


Рисунок 4.3 – Синтез статичної САК методом ЛАХ

За (4.8) для вибраного масиву частот можна побудувати у Matlab графік $\varphi_6(\omega)$ і за ним визначити частоту ω_π з умови $\varphi_6(\omega_\pi) = -\pi$. Побудована ЛФХ $\varphi_6(\omega)$ та зображена на рис. 4.3 ЛАХ $L_6(\omega)$ дозволяють визначити запас за амплітудою ΔL_6 та за фазою $\Delta \varphi_6$ у синтезованій системі.

4.1.3 Синтез коригувального пристрою для астатичної САК

Як приклад, розглянемо задачу синтезу астатичної САК, структурна схема якої наведена на рис. 4.2. Вихідна система включає три аперіодичних ланки та ланку зворотного зв'язку з коефіцієнтом $K_{зз}$.

Для вихідної системи є заданими значення коефіцієнтів передачі ланок $K_1, K_2, K_3, K_{зз}$ та сталих часу T_1, T_2, T_3 . Коефіцієнт передачі вихідної розімкненої системи дорівнює $K_B = K_1 K_2 K_3 K_{зз}$.

До САК, що синтезується, задані вимоги: 1) статизм системи $\delta = 0$ за постійного збурення $f = const$; 2) показники якості перехідного процесу – перерегулювання σ та час регулювання t_p .

Розв'язання задачі синтезу. На 1-му етапі слід визначити порядок аста-тизму системи, що синтезується. Оскільки в САК має бути нульовий статизм, то достатньо забезпечити в системі 1-й порядок аста-тизму за збуренням. Отже низькочастотна ділянка бажаної ЛАХ проходитиме під кутом -20дБ/дек .

На 2-му етапі треба визначити частоту зрізу бажаної ЛАХ та допустимі частоти, що обмежують середньочастотну ділянку зліва і справа. За формулою (4.3), попередньо вибравши K_σ у залежності від допустимої величини перерегулювання σ , отримаємо частоту зрізу ω_z , а допустимі частоти спряження асимптот зліва і справа від частоти зрізу дорівнюватимуть відповідно $\omega' \leq \omega_z/2$ та $\omega'' \geq 2\omega_z$.

На 3-му етапі слід побудувати ЛАХ та визначити $W_k(p)$. Отже за отриманими даними та вихідними параметрами системи будуємо асимптотичні вихідну $L_\epsilon(\omega)$ та бажану $L_\delta(\omega)$ ЛАХ, і за (4.6) шляхом геометричного віднімання знаходимо ЛАХ коригувальної ланки $L_k(\omega)$. Результати графічних побудов представлені на рис. 4.4.

За $L_k(\omega)$ записуємо передатну функцію коригувального пристрою

$$W_k(p) = \frac{K_k(\tau_1 p + 1)}{p}, \quad (4.9)$$

де $\tau_1 = T_1$.

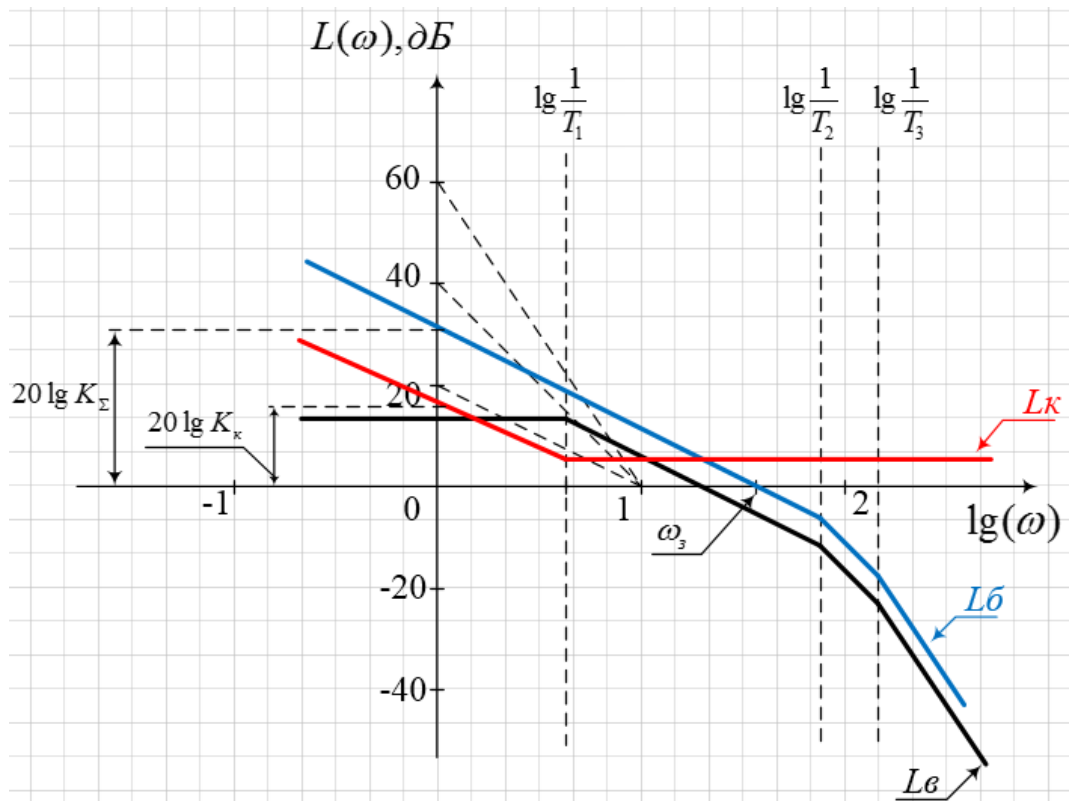


Рисунок 4.4 – Синтез астатичної САК методом ЛАХ

На 4-му етапі треба визначити запаси стійкості для скоригованої системи. Для цього запишемо вираз для ЛФХ бажаної системи

$$\varphi_o(\omega) = -\pi/2 + \arctg(\tau_1 \omega) - \arctg(T_1 \omega) - \arctg(T_2 \omega) - \arctg(T_3 \omega). \quad (4.10)$$

За (4.10) для вибраного масиву частот можна побудувати у Matlab графік $\varphi_o(\omega)$ і за ним визначити частоту ω_π з умови $\varphi_o(\omega_\pi) = -\pi$. Побудована ЛФХ $\varphi_o(\omega)$ та зображена на рис. 4.4 ЛАХ $L_o(\omega)$ дають можливість встановити запас за амплітудою ΔL_o та за фазою $\Delta \varphi_o$ у синтезованій системі.

4.2 Опис лабораторної установки

Лабораторна робота виконується на комп'ютеризованій лабораторній установці (ЛУ). У комп'ютері використовується програмне середовище

Matlab із системою візуального моделювання Simulink. Функціональна схема ЛУ зображена на рисунку 4.5.

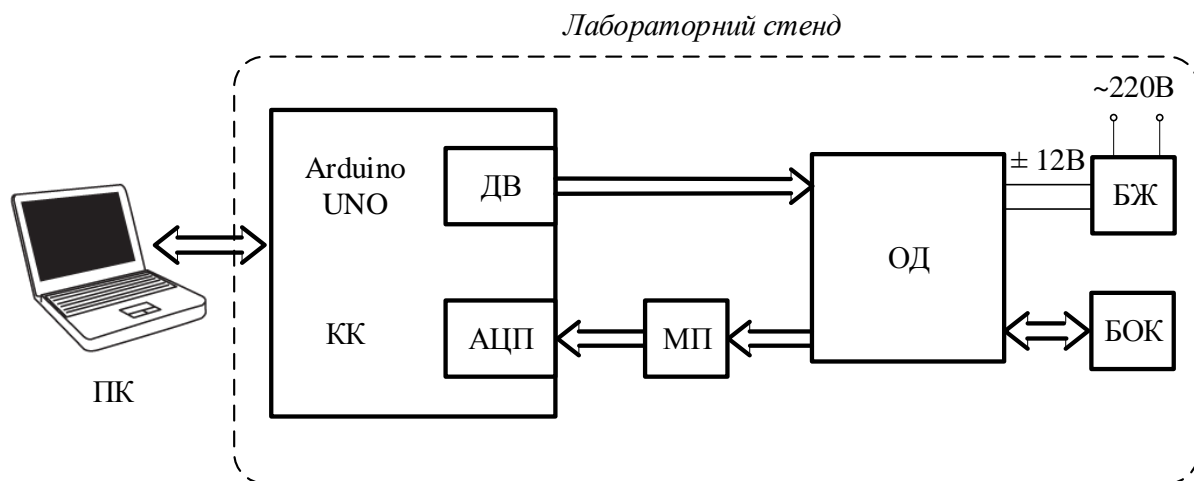


Рисунок 4.5 – Функціональна схема ЛУ для синтезу та дослідження послідовних коригувальних пристроїв САК

На рис. 4.5 задіяно наступні позначення: ПК – персональний комп'ютер; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ПН – перетворювач напруги; ОД – об'єкт дослідження; БЖ – блок живлення; ДВ – дискретний вихід; МП – масштабувальний перетворювач, БОК – блок органів керування.

Для використання графічного інтерфейсу на комп'ютері у програмному середовищі Matlab слід відкрити М-файл з програмою GUI за запустити його. Результатом виконання даного М-файлу буде поява на моніторі графічного інтерфейсу користувача (Graphical User Interface – GUI), скріншот якого представлено на рис. 4.6.

GUI складається з наступних частин: 1 – кнопка очистки послідовного порту, 2 – кнопка підключення керуючого контролера, 3 – випадаюче меню вибору типу зовнішньої дії, 4 – кнопка старту перехідного процесу, 5 – кнопка зчитування даних з пам'яті керуючого контролера, 6 – кнопка для побудови графіка перехідного процесу за отриманими даними, 7 – інформаційне меню, 8 – поле для відображення графіків перехідних процесів.

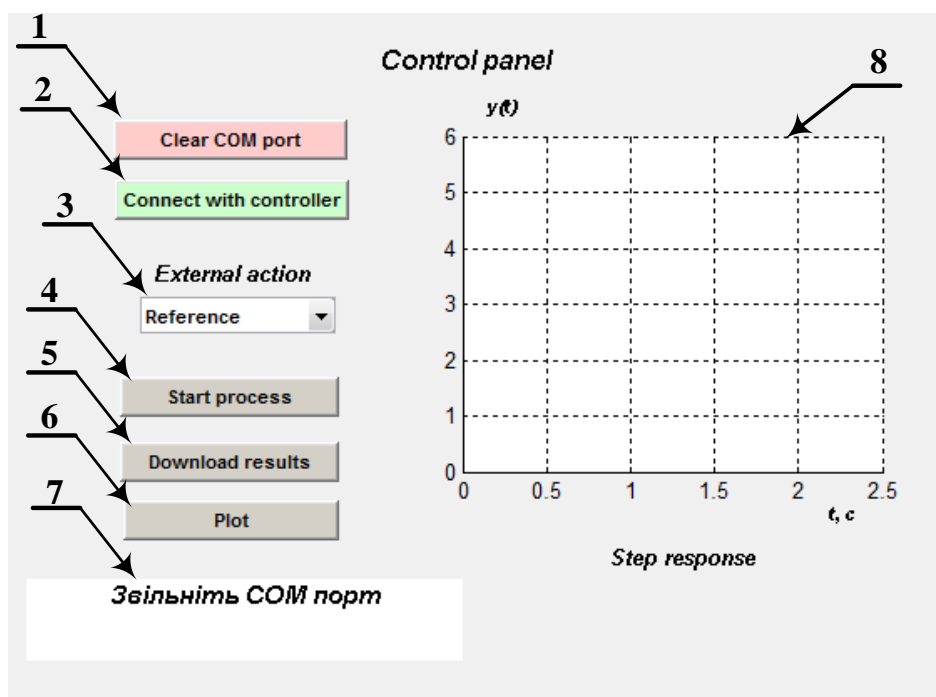


Рисунок 4.6 – Графічний інтерфейс користувача (GUI) в середовищі Matlab

Після запуску GUI треба звернути увагу на інформаційне меню. При написі «Звільніть COM порт» потрібно натиснути кнопку «Clear COM port». При написі «Під’єднайте контролер» потрібно натиснути кнопку «Connect with controller».

Далі слід обрати у випадаючому меню тип зовнішньої дії «*External action*»: завдання «*Reference*» або збурення «*Disturbance*». Вигляд випадаючого меню представлено на рис. 4.7.

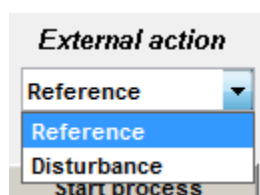


Рисунок 4.7 – Вигляд випадаючого меню в GUI.

Здійснивши усі налаштування, для отримання графіка перехідного процесу потрібно натиснути кнопку «*Start process*» у GUI. При цьому на інформаційній панелі з’явиться повідомлення «Відбувається процес керування...».

Коли завершиться перехідний процес, на інформаційній панелі з'явиться повідомлення «Процес керування завершено, зніміть дані». Щоб зчитати дані треба натиснути кнопку «*Download results*» у GUI.

Після зчитування даних на інформаційній панелі з'явиться повідомлення «Зчитування даних завершено, побудуйте графіки». Для побудови графіків слід натиснути кнопку «*Plot*». У результаті графіки перехідного процесу керованої величини $y(t)$ та завдання $g(t)$ або збурення $f(t)$ будуть побудовані у графічному вікні GUI та в окремому графічному вікні Matlab. Якщо побудовані графіки сигналів містять значні завади, треба повторити пункти 4 – 6.

4.3 Програма роботи

4.3.1. Спочатку слід вивчити будову та принцип роботи ЛУ, підготувати її до роботи.

4.3.2. Для системи, структурна схема якої наведена на рис. 4.2, методом ЛАХ виконати синтез послідовного коригувального пристрою за заданими показниками якості керування. Вихідні дані для вказаного викладачем варіанту наведені в табл. 4.1.

4.3.3. За отриманою ЛАХ коригувального пристрою $L_k(\omega)$ записати передатну функцію регулятора та обчислити значення його налаштувальних опорів.

4.3.4. На лицьовій панелі стенду перемикачами S1 – S3 встановити № варіанту лабораторної роботи, а перемикачем S6 вибрати тип синтезованого регулятора та виставити значення налаштувальних опорів регулятора: R_1^*, R_2^* для ПД-регулятора чи R_3^* для ПІ-регулятора.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для синтезу регуляторів

№ вар.	Коефіцієнти передачі ланок				Сталі часу ланок, с			Показники якості			K_{σ}
								Перерегулювання σ , %	Час регулювання t_p , с	Статизм δ	
1	7	1	2	1	0.25	0.1	0.0067	35	0.16	0.05	3.4
2	2.5	1	2	1	0.25	0.025	0.0067	15	0.2	0.0	1.3
3	15	1	2	1	0.25	0.1	0.0067	35	0.17	0.04	3.4
4	2.5	1	2	1	0.25	0.014	0.0067	20	0.15	0.0	1.7
5	5	1	2	1	0.25	0.1	0.0067	35	0.2	0.06	3.4
6	2.5	1	2	1	0.25	0.01	0.0067	25	0.14	0.0	2.2

4.3.5. Отримати два перехідні процеси в САК без регулятора (перемикач S4 у положенні 0). Перший – при стрибкоподібній зміні завдання, а другий – збурення. За кривими $y(t)$ визначити показники якості керування САК.

4.3.6. Отримати два перехідні процеси в САК з регулятором (перемикач S4 у положенні 1). Перший – при стрибкоподібній зміні завдання, а другий – збурення. За кривими $y(t)$ визначити показники якості керування САК.

4.3.7. Визначити запаси стійкості за модулем та фазою скоригованої САК.

4.3.8. За результатами проведених досліджень зробити висновки та підготувати звіт.

4.4 Методичні вказівки

4.4.1. Починаючи лабораторну роботу, треба подати живлення на ПК та стенд, з'єднати кабелем контролер стенду та роз'єм USB комп'ютера.

4.4.2. При виконанні синтезу послідовного коригувального пристрою методом ЛАХ слід використовувати матеріали п. 4.1.1, п. 4.1.2 (при синтезі статичної САК), п. 4.1.3 (при синтезі астатичної САК) та Додаток А. Вихідні дані для синтезу слід узяти із табл. 4.1. для вказаного викладачем варіанту.

4.4.3. При синтезі статичної САК (варіанти 1, 3, 5) після отримання передатної функції (4.7) коригувального пристрою, слід отримати значення його налаштувальних параметрів. Принципова схема коригувального пристрою (ПД-регулятор) для статичної САК представлена на рис. 4.8.

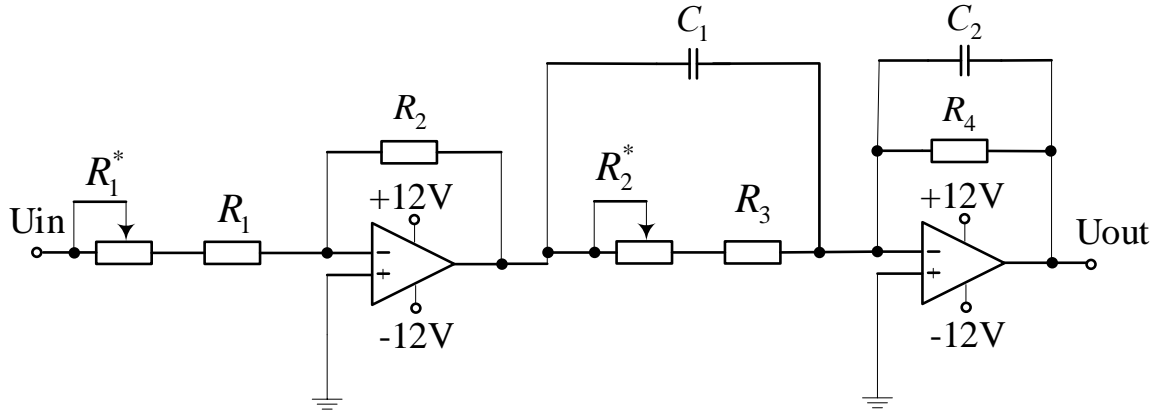


Рисунок 4.8 – Принципова схема ПД-регулятора для статичної САК

Для налаштування сталої часу коригувального пристрою статичної САК потрібно розрахувати опір R_2^* за формулою

$$R_2^* = \frac{\tau_1}{C_1} - R_3, \quad (4.11)$$

де τ_1 – стала часу коригувального пристрою, $C_1 = 5.38 \text{ мкФ}$, $R_3 = 4.7 \text{ кОм}$.

Для налаштування коефіцієнта передачі регулятора статичної САК потрібно розрахувати опір R_1^* за формулою

$$R_1^* = \frac{R_2 R_4}{K_\kappa (R_2^* + R_3)} - R_1. \quad (4.12)$$

де K_κ – коефіцієнт передачі коригувального пристрою; R_1 , R_2 , R_4 – постійні резистори, що дорівнюють 0.68 кОм, 10 кОм, 6.2 кОм відповідно.

Отже на передній панелі лабораторного стенду виставляємо значення налаштувальних резисторів R_1^* , R_2^* .

4.4.4. При синтезі астатичної САК (варіанти 2, 4, 6) після отримання передатної функції (4.9) коригувального пристрою, слід отримати значення

його налаштувальних параметрів. Принципова схема коригувального пристрою (ПІ-регулятор) для астатичної САК представлена на рис. 4.9.

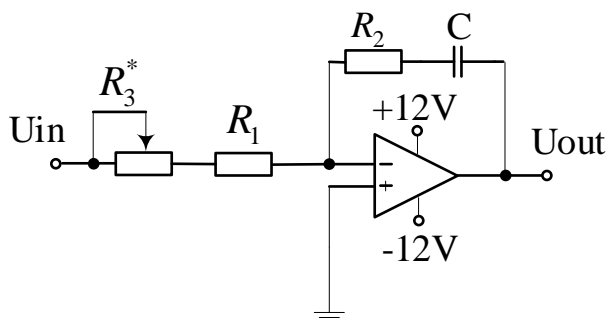


Рисунок 4.9 – Принципова схема ПІ-регулятора для астатичної САК

Для налаштування коефіцієнта передачі регулятора астатичної САК потрібно розрахувати опір R_3^* за наступною формулою:

$$R_3^* = \frac{1}{K_{\kappa} C} - R_1, \quad (4.13)$$

де K_{κ} – коефіцієнт передачі коригувального пристрою, C – конденсатор номіналом 10мкФ. Отже на передній панелі лабораторного стенду виставляємо значення налаштувального резистора R_3^* .

4.4.5. Вибір номеру варіанту лабораторної роботи здійснюється на лицьовій панелі стенду перемикачами S1–S3 згідно з табл. 4.2. Для вибору типу регулятора застосовується перемикач S6 (положення 0 – ПД-регулятор, положення 1 – ПІ-регулятор).

Таблиця 4.2 – Положення перемикачів для вибору варіанту роботи

Перемикач	№ варіанту лабораторної роботи					
	1	2	3	4	5	6
S1	1	1	0	0	0	0
S2	0	0	1	1	0	0
S3	0	0	0	0	1	1
S6	0	1	0	1	0	1

4.4.6. Для отримання перехідного процесу в САК при зміні завдання на стенді перемикач S5 слід встановити у положення 0, а при зміні збурення – у положення 1.

4.4.7. Для встановлення величини зовнішньої дії слід використовувати потенціометр R4. Рекомендоване значення зовнішньої дії – біля 1 В.

4.4.8. Щоб отримати перехідні процеси в САК без регулятора на стенді перемикач S4 має бути у положенні 0, а з регулятором – у положенні 1.

4.4.9. Для отримання перехідних процесів слід запустити програму утворення GUI. Порядок використання графічного інтерфейсу користувача GUI описаний у п. 4.2.3.

4.4.10. Після отримання графіків перехідних процесів визначаються показники якості керування у нескоригованій САК, які заносяться в табл. 4.3, та у скоригованій САК, які заносяться в табл. 4.4.

Значення статизму визначається за реакцією САК на стрибкоподібне збурення як відношення статичної помилки $\Delta = y(t \rightarrow \infty)$ до величини збурення $f(t \rightarrow \infty) = const$ за формулою $\delta = \Delta / f$. Показники якості перехідного процесу – час регулювання t_p та перерегулювання σ визначаються за реакцією САК на стрибкоподібне завдання.

Таблиця 4.3 – Показники якості керування нескоригованої САК

№	Статизм δ	Час регулювання t_p , с	Перерегулювання σ , %
1			

Таблиця 4.4 – Показники якості керування скоригованої САК

№	Статизм δ	Час регулювання t_p , с	Перерегулювання σ , %
1			

4.4.11. Для визначення запасів стійкості скоригованої САК можна скористатися функцією *bode* у програмі Matlab. Лістинг програми для побудови ЛАХ та ЛФХ бажаної системи наведено нижче.

% Формування передатної функції бажаної системи Wb

```

Wk=tf([tau1 1]*Kk,[tau2 1]); % Передатна функція ПД-регулятора
% Wk=tf([tau1 1]*Kk,[1 0]); % Передатна функція ПІ-регулятора
Wv=tf([K1],[T1 1])*tf([K2],[T2 1])*tf([K3],[T3 1])*Kzz;
Wb=Wk*Wv;
% Побудова ЛАХ та ЛФХ бажаної системи
bode(Wb),

```

За побудованими ЛАХ та ЛФХ визначаються запаси стійкості за модулем ΔL_{ϕ} та за фазою $\Delta \varphi_{\phi}$ скоригованої САК.

4.5 Зміст звіту

- 4.5.1. Мета та програма лабораторної роботи, схема системи (рис.4.3).
- 4.5.2. Розрахунок параметрів вихідної та бажаної ЛАХ і їх побудова.
- 4.5.3. Графічний синтез коригувального пристрою за допомогою ЛАХ.
- 4.5.4. Визначення параметрів передатної функції синтезованого регулятора та значень його налаштувальних опорів.
- 4.5.5. Графіки реакцій нескоригованої системи на стрибок завдання та збурення.
- 4.5.6. Показники якості нескоригованої САК (статизм, час регулювання та перерегулювання).
- 4.5.7. Графіки реакцій скоригованої системи на стрибок завдання та збурення.
- 4.5.8. Показники якості скоригованої САК (статизм, час регулювання та перерегулювання).
- 4.5.9. Запаси стійкості за модулем та фазою скоригованої САК.
- 4.5.10. Аналіз впливу регулятора на якість САК.

4.6 Контрольні запитання

- 4.6.1. Як впливає на властивості САК введення від'ємного зворотного зв'язку?
- 4.6.2. Для чого призначені коригувальні пристрої (регулятори) в САК?
- 4.6.3. Як побудувати асимптотичну ЛАХ вихідної системи?

- 4.6.4. Як побудувати бажану ЛАХ?
- 4.6.5. Яка ділянка ЛАХ визначає властивості САК в усталених режимах?
- 4.6.6. Яка ділянка ЛАХ суттєво впливає на показники якості системи в перехідних режимах?
- 4.6.7. Який зв'язок існує між часом регулювання, перерегулюванням і частотою зрізу бажаної ЛАХ?
- 4.6.8. У якому місці САК слід включати послідовний коригувальний пристрій?
- 4.6.9. У якому порядку виконується синтез послідовного коригувального пристрою методом ЛАХ?
- 4.6.10. Запишіть вираз для ЛФХ синтезованого коригувального пристрою.
- 4.6.11. Якщо у зоні низьких частот ЛФХ мінімально-фазової ланки асимптотично наближається до $\pi/2$, то яким буде нахил ЛАХ на цій ділянці?
- 4.6.12. Як визначити запас стійкості САК за модулем на основі ЛАХ та ЛФХ?
- 4.6.13. Якщо у зоні високих частот ЛФХ мінімально-фазової ланки асимптотично наближається до 2π , то яким буде нахил ЛАХ на цій ділянці?
- 4.6.14. Як визначити запас стійкості САК за фазою на основі ЛАХ та ЛФХ?
- 4.6.15. Запишіть вираз для ЛФХ розімкнутої скоригованої САК.
- 4.6.16. Якщо в зоні низьких частот ЛФХ мінімально-фазової ланки асимптотично наближається до $-\pi$, то яким буде нахил ЛАХ на цій ділянці?
- 4.6.17. Побудуйте ЛАХ та ЛФХ послідовно з'єднаних інтегровальної ланки та аперіодичної ланки 1-го порядку.
- 4.6.18. Побудуйте ЛАХ та ЛФХ послідовно з'єднаних диференціювальної ланки та аперіодичної ланки 1-го порядку.
- 4.6.19. Викладіть критерій стійкості Найквіста в логарифмічній формі.

4.6.20. Якщо у зоні високих частот ЛФХ мінімально-фазової ланки асимптотично наближається до -3π , то яким буде нахил ЛАХ на цій ділянці?

Література

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., – СПб, Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
3. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / В.А. Бесекерский [и др.]. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
4. Теорія автоматичного керування : Частина II : Курс лекцій / Уклад. М.Г. Попович, Б.І. Приймак. – К.: НТУУ "КПІ", 2012. – 165 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/2209>.
5. Control System Toolbox. User's Guide, The MathWorks, Release 2009b, 2009.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Попович М.Г., Ковальчук О.В.* Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
2. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., – СПб, Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
3. *Phillips C., Harbor R.* Feedback control systems, Prentice-Hall, 2000, 658 p.
4. *Теорія автоматичного керування : Частина I : Курс лекцій / Уклад. М.Г. Попович, Б.І. Приймак.* – К.: НТУУ "КПІ", 2010. – 182 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/770>.
5. *Теорія автоматичного керування : Частина II : Курс лекцій / Уклад. М.Г. Попович, Б.І. Приймак.* – К.: НТУУ "КПІ", 2012. – 165 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/2209>.
6. *Теорія автоматичного керування : метод. вказівки до практичних занять з дисципліни / Уклад. Б.І. Приймак.* – К.: НТУУ "КПІ", 2012. – 71 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/2208>.
7. *Control System Toolbox. User's Guide, The MathWorks, Release 2009b, 2009.*

Додаток А

Порядок побудови асимптотичних ЛАХ

1. Побудова системи координат. На осі абсцис відкладають значення частот через декаду і проставляють значення логарифмів цих частот (рис. А.1.)

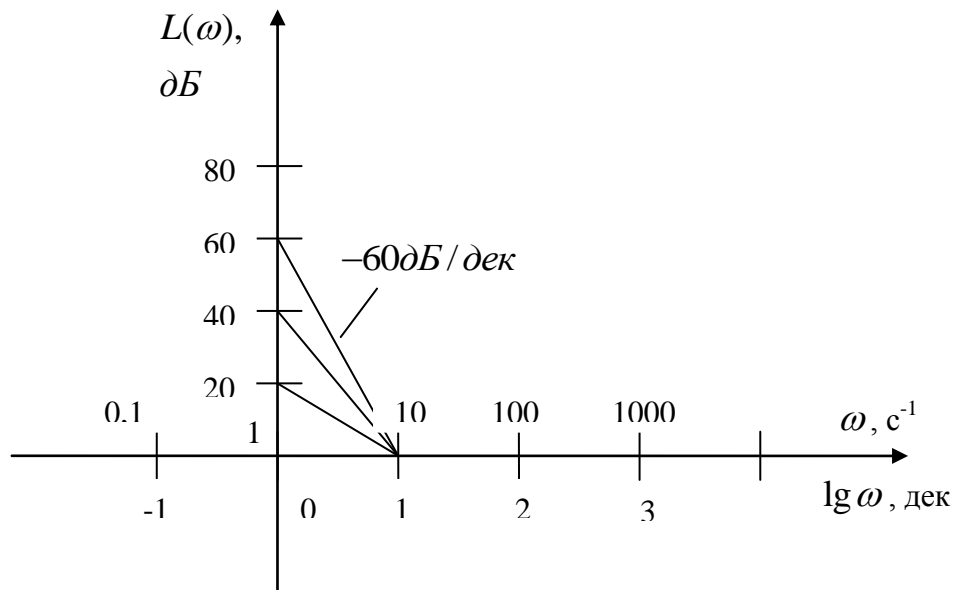


Рисунок А.1 – Осі координат ЛАХ

Вісь ординат зазвичай проводять через точку $\omega=1$ ($\lg \omega=0$). На осі ординат відкладають масштаб ЛАХ у дБ через 20 дБ. Для одержання ліній нахилу ЛАХ відповідно -20 дБ/дек, -40 дБ/дек, -60 дБ/дек значення 20, 40 і 60 дБ осі ординат з'єднують із точкою $\omega=10$ ($\lg \omega=1$) осі абсцис.

2. Побудова асимптотичної ЛАХ вихідної САК. На частоті $\omega=1$ відкладають ординату $L(1)=20\lg K_B$, де K_B – коефіцієнт передачі розімкнутої вихідної системи. Через отриману точку проводять пряму – низькочастотну асимптоту ЛАХ із нахилом до осі абсцис, рівним $-\nu 20$ дБ/дек, де ν – кількість інтеграторів (порядок астатизму) у розімкнутій системі.

Визначають логарифми частот спряження елементарних ланок, що входять у передатну функцію розімкнутої системи:

$$\lg \omega_i = \lg T_i^{-1} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

де n – кількість елементарних ланок.

Значення логарифмів частот спряження всіх елементарних ланок відкладають на осі абсцис і через отримані точки проводять вертикальні пунктирні прямі лінії.

Низькочастотна асимптота продовжується до першої вертикальної пунктирної прямої (до першої частоти спряження). У точці їхнього перетину нахил ЛАХ змінюється відповідно до характеру елементарної ланки, що має дану частоту спряження.

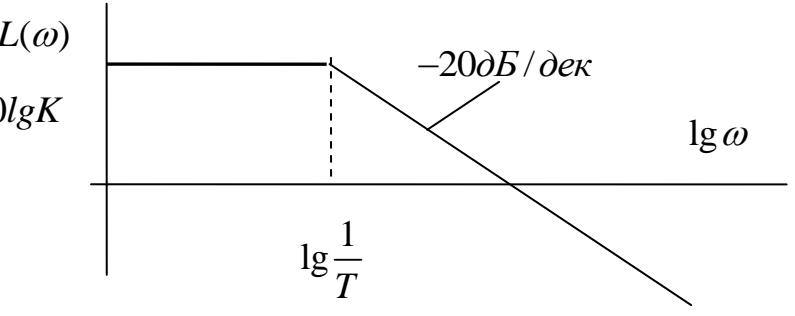
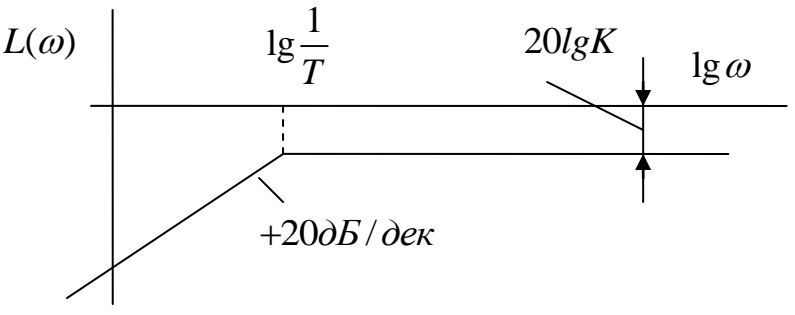
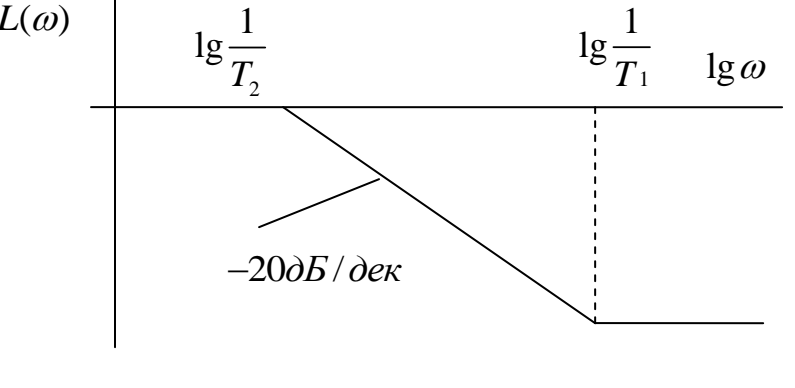
Для аперіодичної ланки нахил низькочастотної асимптоти змінюють на -20 дБ/дек , для коливальної на -40 дБ/дек , для форсувальної ланки першого порядку – на $+20 \text{ дБ/дек}$ а для форсувальної ланки другого порядку – на $+40 \text{ дБ/дек}$.

З отриманим нахилом до осі абсцис проводять пряму до наступної пунктирної прямої (частоти спряження), де її нахил змінюють відповідно до характеру ланки, що має цю частоту спряження. Цей процес продовжують до одержання високочастотної асимптоти ЛАХ.

3. Побудова асимптотичної бажаної ЛАХ. Принципи побудови асимптотичної ЛАХ розімкнутої бажаної системи висвітлені у підрозділі 4.1.1

У табл. А.1 наведено ЛАХ деяких типових ланок.

Таблиця А.1 – ЛАХ деяких типових ланок

W(p)	ЛАХ
$\frac{K}{Tp+1}$	 <p> $L(\omega)$ $20\lg K$ $-20\text{дБ}/\text{дек}$ $\lg \frac{1}{T}$ $\lg \omega$ </p>
$\frac{KTp}{Tp+1}$	 <p> $L(\omega)$ $\lg \frac{1}{T}$ $20\lg K$ $+20\text{дБ}/\text{дек}$ $\lg \omega$ </p>
$\frac{T_1p+1}{T_2p+1}$ $T_1 < T_2$	 <p> $L(\omega)$ $\lg \frac{1}{T_2}$ $\lg \frac{1}{T_1}$ $\lg \omega$ $-20\text{дБ}/\text{дек}$ </p>

Додаток Б

Заходи з техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт

Перед початком лабораторних робіт проводиться інструктаж з правил безпеки згідно з інструкцією з охорони праці, затвердженою розпорядженням декана ФЕА. Після вивчення і перевірки знань цієї інструкції прізвище кожного студента заноситься до контрольного листа, де він ставить свій особистий підпис.

Під час виконання лабораторної роботи студентам забороняється:

- заходити за огороження робочих місць, торкатися неізольованих струмопровідних частин обладнання, а також конструкцій обладнання, які обертаються;
- збирати схеми або робити перемикання в них, усувати недоліки без відключення установки;
- підніматися на фундаменти машин;
- стояти поряд з незахищеними кожухами, муфтами, дисками та частинами машин, що обертаються;
- підключати та знімати з'єднувальні провідники під напругою;
- розбирати схеми не викручуючи клеми, виривати з'єднувальні провідники із клем;
- приєднувати провідники до приладів, машин та апаратів без напаяних наконечників;
- користуватися реостатами з поганими контактами;
- робити перемикання на головних (розподільних) щитах;
- вмикати напругу до перевірки викладачем правильності з'єднань у схемі;
- виконувати лабораторну роботу одному.

Студенти зобов'язані:

- перед вмиканням схеми перевірити, в якому положенні знаходиться решта членів бригади (чи торкається хто-небудь до струмопровідних частин або до частин машин, які можуть обертатися) та попередити голосом: «Обережно, вмикаю!»;
- не залишати лабораторну установку без нагляду, постійно спостерігати за її справною роботою.

Після закінчення роботи необхідно відімкнути лабораторну установку, розібрати схему, акуратно скласти провідники, навести порядок на робочому місці, повідомити викладача про всі неполадки (якщо вони є), виявлені під час роботи.

У випадку ураження електричним струмом:

- негайно звільнити потерпілого від дії електричного струму шляхом відімкнення електромережі або відтягти його за одяг, при цьому свої руки ізолювати;
- провести (якщо потрібно) штучне дихання, зовнішній масаж серця, при необхідності викликати швидку медичну допомогу або лікаря.